



João Filipe da Silva Xavier

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Análise de custo-óptimo de soluções para envolvente de edifícios

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Pinho
Arguente: Prof. Doutor Miguel Amado
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março, 2014

João Filipe da Silva Xavier

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Análise de custo-óptimo de soluções para
envolvente de edifícios**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei, FCT/UN

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Pinho
Arguente: Prof. Doutor Miguel Amado
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



Maio, 2014

‘Copyright’ João Filipe da Silva Xavier, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Agradecimentos

Gostaria, em primeiro lugar, de agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei pela disponibilidade na escolha e orientação deste tema, bem como pelo interesse e atenção demonstrados no decorrer da elaboração desta dissertação.

Agradeço aos meus pais por toda o amor, paciência e sacrifício de que o meu percurso académico deles necessitou. Agradeço à minha irmã e ao Gonçalo pela ajuda incondicional que me prestaram na realização deste trabalho, sinto-o tão meu, como deles.

Sinto-me ingrato por os deixar sem nome, mas não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que me foram importantes ao longo da minha formação pessoal e académica. Para eles o meu sentido obrigado.

Resumo

A actual crise no sector da construção impele imperativamente a que as soluções construtivas aplicadas a edifícios cumpram determinados critérios, que garantam a maior sustentabilidade possível. Assim, na procura de maior conforto térmico e de encontro a um consumo de energia mais sustentável, é cada vez mais pertinente estudar soluções que potencializem um melhor desempenho dos edifícios, tendo em consideração não só os critérios de conforto térmico e de durabilidade, mas também a conjuntura económica e energética.

Na sequência da publicação da Directiva de Desempenho Energético de Edifícios pela União Europeia de 2010 (EPBD recast), os estados membros são obrigados a efectuar, para edifícios novos e em grandes remodelações, uma análise de várias soluções de forma a obter a de maior rentabilidade, correspondente à solução de custo óptimo. Este custo óptimo, conforme indicado na publicação, deve estar associado a uma solução cujas necessidades energéticas não distem mais de 15% do mínimo regulamentar do estado membro em que a mesma se insere.

Esta dissertação analisa o custo óptimo de um conjunto de soluções de envolvente de edifícios, verificando a diferença de necessidades energéticas de aquecimento, entre a solução de custo óptimo e os mínimos regulamentares vigentes. Para isso é calculado o Valor Anual Equivalente como indicador de Custo de Ciclo de Vida das soluções consideradas.

Os resultados demonstraram que soluções tecnicamente mais evoluídas e de maior custo inicial se revelaram, com o aumento de rigor de zona climática de Inverno, ser as soluções económica e ecologicamente mais viáveis.

Termos chave: Análise de Ciclo de Vida, Custo óptimo, EPBD, Espessura óptima de isolamento térmico

Abstract

The actual crisis in the Construction sector makes more important than ever that the technical solutions applied to buildings fulfill some requisites that make possible to achieve a greater sustainability. Therefore, when seeking for more thermal comfort and less energy consumption, it is important to consider ways that help technical solutions achieve high levels of accuracy, considering, for that matter, what are today, not only the standards of thermal comfort and buildings's durability, but also the present and future economic and energetic scenarios.

The European Commission, accordingly to the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) dictates that, for new buildings and large retrofitting, it must be analyze a set of options in order to isolate the utmost economic benefit, corresponding to the cost-optimal solution. The cost-optimal, as mentioned, must represent a solution for which energetic needs aren't further than 15% de minimum requirements for that Member State.

This work has as purpose to estimate, following the Portuguese Legislation for energy performance of buildings (RCCTE) calculation method, the cost-optimal solutions for building envelope elements (walls, windows and roof) and by that verify the distance between them and minimum requirements. For that measure the Equivalent Annual Cost as Life-Cycle Cost indicator it's calculated for a series of alternatives.

The results have shown that most expensive and technically advanced solutions have more economic viability with the increase of heating degree-days.

Key terms: Life Cycle Cost Analysis, Cost-optimal, EPBD, Optimum insulation thickness

Índice

Resumo.....	I
Abstract	III
Índice de Quadros	VII
Índice de Figuras.....	IX
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	XI
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do Tema.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objectivo	2
1.4 Metodologia	2
1.5 Estrutura do Trabalho	3
2 Optimização de custos e Análise de Custo de Ciclo de Vida	5
2.1 Introdução	5
2.2 Métodos de Análise de Custo de Ciclo de Vida	7
2.2.1 Método de Custos Globais de acordo com EN15459.....	11
2.2.2 Método das Anuidades	12
2.2.3 Outros métodos de avaliação económica	13
2.3 Incerteza e Risco.....	14
2.3.1 Método Qualitativo	14
2.3.2 Método Quantitativo.....	15
2.4 Espessura óptima de isolamento térmico.....	16
3 Casos de estudo.....	21
3.1 Caracterização de casos de estudo	21
4 Análise de Custo óptimo aplicado aos casos de estudo.....	33
4.1 Metodologia de Cálculo.....	33
4.1.1 Custos de Soluções técnicas.....	34
4.1.2 Custo de energia.....	36
4.2 Análise de sensibilidade	38
4.2.1 Cenários 1,2 e 3	39
4.2.2 Cenários A e B.....	39

4.3	Apresentação de resultados.....	41
4.4	Almada.....	43
4.4.1	Caso I	43
4.4.2	Caso II	44
4.4.3	Caso III	45
4.4.4	Caso IV	46
4.4.5	Resumo.....	48
4.5	Porto.....	49
4.5.1	Caso I	49
4.5.2	Caso II	50
4.5.3	Caso III	52
4.5.4	Caso IV	53
4.5.5	Resumo.....	54
4.6	Bragança.....	56
4.6.1	Caso I	56
4.6.2	Caso II	57
4.6.3	Caso III	58
4.6.4	Caso IV	60
4.6.5	Resumo.....	61
4.7	Características genéricas.....	62
4.7.1	Paralelismo entre diferentes casos de estudo	63
4.7.2	Evolução com aumento de graus-dias de aquecimento	64
4.8	Análise de sensibilidade	65
4.8.1	Cenários 1,2 e 3	65
4.8.2	Cenários A e B.....	67
5	Conclusão	71
	Bibliografia.....	73

Índexdece de Quadros

Quadro 2.1 Prós e Contrás da ACCV	6
Quadro 2.2- Categorias de informação numa ACCV.	8
Quadro 3.1-Variáveis climáticas das localizações em estudo, segundo o RCCTE	23
Quadro 3.2-Classificações de cobertura	27
Quadro 3.3-Características morfológicas dos casos de estudo	27
Quadro 4.1-Variáveis económicas e energética, eficiência de equipamento e factor de utilização	40
Quadro 4.2-Resumo de resultados para Almada	48
Quadro 4.3-Resumo de resultados para Porto	55
Quadro 4.4-Resumo de resultados para Bragança	62
Quadro 4.5-Resumo de resultados da análise a cenários 1,2 e 3	67
Quadro 4.6-Resumo de resultados da análise a cenários A e B	69

Índice de Figuras

Figura 2.1-Organização de custos.	9
Figura 2.2-Fluxograma de processo dos métodos de Anuidade e de Custo Global.....	10
Figura 2.3-Gráfico de espessura óptima de isolamento térmico	17
Figura 2.4-Diferenças entre U óptimo e U regulamentado para diferentes cidades europeias.....	19
Figura 3.1-Representação esquemática de Casos de estudo.....	22
Figura 3.2- Distribuição de alojamentos familiares clássicos, ocupados com residência habitual, segundo o escalão de área útil, por época de construção do edifício	22
Figura 3.3- Número de edifícios clássicos segundo o tipo de estrutura de construção.....	24
Figura 3.4- Evolução histórica das paredes em Portugal.	25
Figura 3.5-Metros quadrados de ETICS instalados (Dados APFAC).....	26
Figura 3.6-Decomposição da radiação incidente num envidraçado	30
Figura 4.1 - Estrutura de custos.....	34
Figura 4.2-Construção gráfica de custos totais	41
Figura 4.3-Esquema gráfico de custo-óptimo	42
Figura 4.4-Solução óptima para caso I, em Almada	43
Figura 4.5-Gráfico de custo-óptimo para caso I, em Almada.....	43
Figura 4.6- Solução óptima para caso II, em Almada	44
Figura 4.7-Gráfico de custo-óptimo para caso II, em Almada.....	45
Figura 4.8- Solução óptima para caso III, em Almada	45
Figura 4.9-Gráfico de custo-óptimo para caso III, em Almada.....	46
Figura 4.10- Solução óptima para caso IV, em Almada	47
Figura 4.11-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, em Almada	47
Figura 4.12- Solução óptima para caso I, para o Porto	49
Figura 4.13-Gráfico de custo-óptimo para caso I, para o Porto	50
Figura 4.14- Solução óptima para caso II, para o Porto	51
Figura 4.15-Gráfico de custo-óptimo para caso II, para o Porto	51
Figura 4.16-- Solução óptima para caso III, para o Porto	52
Figura 4.17-Gráfico de custo-óptimo para caso III, para o Porto	53
Figura 4.18- Solução óptima para caso IV, para o Porto	54
Figura 4.19-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, para o Porto.....	54
Figura 4.20- Solução óptima para caso I, em Bragança	56
Figura 4.21-Gráfico de custo-óptimo para caso I, em Bragança	57
Figura 4.22- Solução óptima para caso II, em Bragança	58
Figura 4.23-Gráfico de custo-óptimo para caso II, em Bragança	58
Figura 4.24- Solução óptima para caso III, em Bragança	59
Figura 4.25-Gráfico de custo-óptimo para caso III, em Bragança	59
Figura 4.26- Solução óptima para caso IV, em Bragança	60
Figura 4.27-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, em Bragança.....	61
Figura 4.28-Cenários 1,2 e 3, para Almada	65
Figura 4.29-Cenários 1,2 e 3, para Porto.....	65
Figura 4.30-Cenários 1,2 e 3, para Bragança.....	66

Figura 4.31-Cenários A e B, para Almada	68
Figura 4.32-Cenários A e B, para Porto	68
Figura 4.33-Cenários A e B, para Bragança	69

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Siglas

APFAC – Associação Portuguesa de Fabricantes de Argamassas de Construção

APP – *Atactic PolyPropylene*

CCV – Custo de Ciclo de Vida

COP – *Coefficient of Performance*

EN – Norma Europeia

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

EPS – Poliestireno expandido moldado

ETICS – *External Thermal Insulation Composite System*

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

ICB – Aglomerado de cortiça expandida

INE – Instituto Nacional de Estatística

ISO – *International Organization for Standardization*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MW – Lã mineral

nZEB – *nearly Zero Energy Building*

PNAEE – Plano Nacional de Acção para Eficiência Energética

RCCTE – Regulamento de Comportamento de Características Térmicas de Edifícios

UE – União Europeia

UNL – Universidade Nova de Lisboa

VAE – Valor Anual Equivalente

VAL – Valor Actual Líquido

XPS – Poliestireno expandido extrudido

Notações escalares latinas

A_p – Área Útil de Pavimento (m^2)

GD – Graus-Dias de Aquecimento ($^{\circ}C.dias$)

G_{sul} – Radiação incidente num envidraçado a Sul ($kWh/m^2.mês$)

N_i – Necessidades Nominais de Aquecimento em Energia Útil Máximas ($kWh/m^2.a$)

N_{ic} – Necessidades Nominais de Aquecimento em Energia Útil Calculadas ($kWh/m^2.a$)

U – Coeficiente de Transmissão Térmica ($W/m^2.^{\circ}C$)

U_f – Coeficiente de Transmissão Térmica de caixilhos ($W/m^2.^{\circ}C$)

U_g – Coeficiente de Transmissão Térmica de vidro ($W/m^2.^{\circ}C$)

U_w – Coeficiente de Transmissão Térmica de vãos envidraçados ($W/m^2.^{\circ}C$)

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

Desde a revolução industrial, a energia apresenta-se como um bem fulcral para o crescimento económico, tecnológico e social. Dado o seu carácter fundamental, a sua procura é constante, no entanto os recursos energéticos (como são o petróleo, o carvão e o gás natural) não têm uma distribuição geográfica equalitária. Assim, à escala mundial, existe uma instabilidade na procura e oferta do mercado energético, estando este à mercê de conjunturas político-sociais e macroeconómicas, maioritariamente dos países exportadores.

De entre as várias crises energéticas que se sucederam no século XX, as crises nos anos 70 foram as que criaram uma maior instabilidade com consequências no quotidiano do panorama global, com os preços do petróleo a registarem aumentos exponenciais. Houve então, a nível europeu, a necessidade de reavaliar a gestão energética de forma a reduzir a dependência externa. Assim “As crises de energia não poderiam prestar melhor serviço que o de tornar imperiosa a necessidade de uma política energética para a Comunidade Económica Europeia. Com efeito, ficou demonstrado a vulnerabilidade da economia europeia às interrupções ou restrições de fornecimento, bem como às fortes subidas dos preços da energia. Ficou também evidente, a necessidade de uma evolução das estruturas de abastecimento para uma menor dependência, o que implica um vigoroso esforço na economia da energia, na utilização dos recursos endógenos e no desenvolvimento de fontes alternativas ao petróleo” [1].

Actualmente, a procura de fontes de energia fóssil tenderá a aumentar, devido às chamadas economias emergentes de elevados índices populacionais, o que representará uma acréscimo da dependência energética.

A União Europeia comprometeu-se com uma série de orientações políticas que visam a adopção de fontes de energias renováveis e melhoria da eficiência energética [2], prevendo uma redução em 20% do consumo até 2020 enfatizando-se em particular o potencial de redução de 27% para edifícios residenciais, que correspondem a 40% do consumo de energia total. Surge em consequência, em 2010, uma nova Directiva Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD recast) preconizando um reforço nas exigências mínimas anteriores, de forma a existir uma aproximação cada vez maior do conceito de edifício de balanço energético nulo ou quase-nulo e introduzindo o conceito de custo, óptimo de forma a que os investimentos reflectam, a longo prazo, retorno energético [3].

A noção de custo óptimo introduzida ganha acrescida relevância face à crise que o sector da Construção atravessa, funcionando a favor de uma maior sustentabilidade para o sector. Este conceito comporta em si a necessidade de que as decisões sejam as mais viáveis, não só no imediato, mas principalmente para um período idealizado de tempo. Importa então que a tecnologia seja alvo de escrutínio, assim como os cenários macroeconómico e energético mereçam também uma atenção

na definição dos critérios que definam a melhor solução, tanto em termos económicos como em termos ambientais.

1.2 Motivação

No caso de Portugal, embora a estrutura legislativa existente tenha impulsionado uma melhoria na eficiência, estabelecendo o Sistema de Certificação Energética e o Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) [2], ainda não existe uma transposição da EPBD recast que reflecta a importância da rentabilidade económica nas medidas a aplicar, de forma a melhorar o desempenho energético dos edifícios, nem uma metodologia para a mesma.

A necessidade de avaliar os mínimos regulamentares nacionais para o comportamento térmico de edifícios em termos de viabilidade económica é portanto a motivação deste trabalho. Esta avaliação, já executada em outros países da UE, levou a alterações dos mínimos regulamentares nacionais para valores, em alguns casos 200% mais rígidos [4].

1.3 Objectivo

A presente dissertação propõe, fazendo uso do Regulamento de Comportamento de Características Térmicas de Edifícios (RCCTE) [5] enquanto ferramenta de cálculo de necessidades energéticas, avaliar a diferença económica e energética entre soluções que respeitem os mínimos regulamentados para o comportamento energético de edifícios residenciais e soluções que correspondam a níveis óptimos de rentabilidade económica. Aplicando, para isso, uma metodologia de Análise de Custo de Ciclo de Vida para um conjunto de casos de estudo.

As diferenças de custos e de necessidades energéticas são analisadas considerando os valores recomendados para essas diferenças dispostos na EPBD recast [3]. Como consequência deste processo pretende-se de igual forma identificar as soluções construtivas da envolvente que, economicamente, melhor se adequam à zona climática em que se encontram.

1.4 Metodologia

Através do método de Valor Anual Equivalente é feita uma análise de custos de ciclo de vida que pretende isolar a solução de custo óptimo. Para execução deste método são avaliadas as

necessidades energéticas de aquecimento de oito soluções construtivas para a envolvente opaca e três soluções de vãos envidraçados, para quatro casos de estudo, em três localizações distintas representativas das três zonas climáticas de Inverno para Portugal Continental.

Como parte do método são apuradas as necessidades energéticas de aquecimento para cada uma das soluções geradas e a estas necessidades associado um custo, o valor anual equivalente. Este custo tem em consideração não só os custos das soluções construtivas mas também a importância de variáveis económicas e energéticas para o período de estudo considerado.

O menor Valor Anual Equivalente para cada caso de estudo e zona climática, corresponderá ao custo óptimo, e consequentemente à solução desejável, a solução economicamente mais viável.

1.5 Estrutura do Trabalho

A dissertação inicia-se no primeiro capítulo, desenvolvendo o enquadramento geral do trabalho, apresentando o paradigma energético, particularizando esse mesmo paradigma para o sector da construção de edifícios e dando a conhecer o conceito de custo óptimo das medidas que importam no desempenho energético de edifícios. Neste capítulo são expostos as motivações e objectivos desta dissertação.

No segundo capítulo é feita uma revisão sobre metodologias de avaliação de viabilidade de projecto e métodos de optimização de custos aplicados a edifícios no campo do desempenho energético eficaz.

No terceiro capítulo são apresentados os casos de estudo, expondo os dados que estão ligados à definição dos mesmos.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia usada na construção dos valores de custo total e posterior individualização de custos totais óptimos, são explanados os pressupostos e cenários considerados inerentes a este processo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados para os vários casos de estudo e localizações, comparando estes resultados com os mínimos regulamentares.

Por fim, no sexto capítulo é feita uma conclusão geral sobre este trabalho e apresentadas ideias para futuros desenvolvimentos.

2 Optimização de custos e Análise de Custo de Ciclo de Vida

2.1 Introdução

A elaboração de um projecto de engenharia implica que a existência de opções e condicionantes seja uma constante, cabendo ao engenheiro o papel de decidir a melhor opção. A melhor opção é tanto mais difícil de isolar, quanto mais complexos forem os projectos, quantas mais opções existirem, quanto maior for o número de critérios a pesar para o cumprimento de objectivos, a que os projectos se propõem e quanto mais semelhantes em termos de resultado final forem. Salvo raras excepções, em que os objectivos pressupõem uma submissão da lógica face à objectividade/razão técnica, como é o caso de obras de carácter artístico e forte componente estética/cultural, o melhor projecto será aquele que cumpre as suas exigências funcionais com maior rigor, em comunhão com eficiência técnico-económica. O recorrente é que para um engenheiro o despiste da melhor opção em termos técnicos (e de cumprimento de objectivos) não se compadece com o despiste da melhor opção em termos económicos. Essa dificuldade em isolar as melhores opções, leva a que se recorra à Engenharia Económica que, “como um conjunto de técnicas que simplifica uma comparação económica” [6], isola por fim a melhor opção.

A análise de custo de ciclo de vida (ACCV) é a análise de todos os custos de um produto ou processo ao longo da sua vida útil. Esta análise permite avaliar a viabilidade de um projecto, em termos de investimento e custos futuros, considerando opções de construção tecnicamente equiparáveis. A análise dá assim ao investidor uma visão mais realista e de maior compreensão acerca do investimento que lhe é apresentado, bem como do funcionamento do edifício em causa.

A ACCV é especialmente funcional para avaliação de projectos em que os custos operacionais, de manutenção e, em último caso, de desmantelamento, são considerados como potencialmente decisivos na escolha do melhor projecto. A ACCV é também particularmente adequada na avaliação de medidas que satisfaçam um determinado nível pretendido de funcionamento, que têm em si diferentes custos, sejam iniciais, de reparação/manutenção ou operacionais [7].

A ACCV permite em especial uma análise de custos de edifícios. Considerando os elevados valores monetários envolvidos nesta área, a ACCV potencializa poupanças significativas mantendo em simultâneo níveis de qualidade. Esta análise, ainda pouco utilizada, carece de um desenvolvimento através da criação de exemplos práticos, que permitam uma menor resistência à sua utilização. Existem especialmente dois campos que revelam resistência e desadequação da ACCV: a sua viabilidade na consideração da sustentabilidade ambiental e o paradigma da viabilidade para empreiteiro e dono de obra.

De forma a simplificar as limitações e os aspectos positivos da ACCV enquanto metodologia, Gluch e Baumann publicaram uma lista de pontos que caracterizam esta análise, projectando em consequência os aspectos que para a ACCV, como método, devem ser trabalhados e aprimorados [8], ver Quadro 2.1.

Quadro 2.1 Prós e Contras da ACCV [8]

Prós da ACCV	Contras da ACCV
-Unidade reconhecida, a unidade monetária;	-Falta de poder decisivo perante incerteza;
-Indica quais os aspectos fundamentais;	-Incapacidade em lidar com decisões irreversíveis;
-Filtra o fluxo de informação ao simplificar as alternativas com diferentes atributos;	-Simplifica em excesso problemas ambientais numa dimensão monetária;
-Aprendizagem consequente da participação no processo de cálculo;	-Subestima custos ambientais futuros;
-Considera uma perspectiva de ciclo de vida;	-Possibilidade de condicionar aprendizagem se for mecanizado;
	-Elevada influência de variáveis estimadas, fruto da complexidade do edifício e do processo de construção;

Este tipo de análise é por vezes desconsiderada. No caso das estruturas, o custo associado à sua execução é sobretudo um custo inicial, com os valores de custos operacionais e de manutenção com uma representação muito reduzida. No caso de construções residenciais e de escritórios, a definição de custos operacionais e de manutenção é difícil de precisar. Como tal o custo inicial, mais fiável e fácil de calcular, é o de maior peso na escolha do cliente [9]. Este processo de decisão, considerando os custos iniciais, mesmo que sejam facilmente calculados quando comparados com os outros custos, perde viabilidade ao ser confrontado com o facto de que um edifício de escritórios consome o triplo dos seus custos iniciais num período de 25 anos [10]. Na prática, uma vez que na grande maioria dos casos o empreiteiro não é o dono de obra (utilizador final da construção), existe uma divergência de objectivos. O empreiteiro terá para si como mais vantajoso a elaboração de uma obra que cumpra os requisitos mínimos de durabilidade e qualidade, desconsiderando portanto os factores que potencialmente optimizem os custos relacionados com a utilização e manutenção da obra. Estes custos têm um grande peso para o dono da obra e utilizador final, uma vez que são suportados pelo mesmo, como tal, o ideal para este seria vê-los reduzidos a um nível óptimo, que garanta, em simultâneo, níveis de qualidade desejáveis. Em Portugal, o custo de uma obra tem em conta apenas o custo dos trabalhos necessários à sua execução. Estes são acordados no caderno de encargos com o dono de obra, de acordo com o artigo 40º Regime jurídico de empreitadas públicas [11]. O custo considerado para efeitos legais não tem portanto em conta custos decorrentes da utilização da obra e em última análise custos do seu desmantelamento.

Projectos que tenham em conta a eficiência térmica de um dado edifício, são exemplo de casos em que o escrutínio deve ser maior e uma ACCV tem uma maior preponderância na sustentabilidade. Nestes casos, os custos de utilização do edifício (energia, manutenção/reparação de sistemas de aquecimento, etc) tendem ao longo do ciclo de vida do edifício a ultrapassar os custos iniciais. Desse ponto de vista, torna-se fulcral encontrar a solução, em termos de custos, mais optimizada, correspondente a um menor custo de ciclo de vida. Tenha-se como exemplo, o isolamento térmico aplicado, este pode variar em termos de resistência térmica instalada, variando em simultâneo os custos associados. É também exemplo, o sistema de vãos envidraçados existente, que em termos de características varia não só, na sua resistência térmica, mas também na sua capacidade de absorver e reflectir radiação solar. Muitas destas opções produzem reduções de custos, mas só uma é considerada a solução óptima [7] [12].

Embora sejam maioritariamente considerados em grandes projectos públicos de Construção, estes estudos também começaram a ser considerados no paradigma de aquecimento de habitações de forma activa ou passiva.

A verdade é que até aos finais da década de 70, tendencialmente nos países a maiores latitudes, o conforto térmico era garantido maioritariamente por meio de sistemas de aquecimento de baixo rendimento, uma vez que até aí a energia era um bem “barato” e de procura/oferta estável, existindo consequentemente alguma displicência no dimensionamento de soluções de controlo térmico para os edifícios. As crises energéticas mundiais nos finais dessa década, vieram então levantar questões sobre o paradigma do aquecimento de edifícios, isto perante aumentos da energia eléctrica e combustíveis fósseis de 92% e 111% respectivamente [13].

Com base nesta necessidade de viabilizar económica e ecologicamente o aquecimento de edifícios, a União Europeia publica a EPBD recast [3]. Esta directiva veio impor uma regulamentação que, para além de visar aumentar os requisitos mínimos de desempenho energético de edifícios, prevê que sejam fomentadas medidas, de forma a que, o critério seja não só cumprir os mínimos, mas sim aproximar a construção de edifícios do conceito de Edifício de Necessidades Quase-nulas (nZEB nearly-zero Energy Building). Para isso a EPBD recast introduz um “Quadro para a metodologia comparativa para a determinação dos níveis óptimos de rentabilidade dos requisitos de desempenho energético aplicáveis a edifícios e componentes” [3]. Este visa sobretudo, que de entre várias soluções técnicas possíveis, sejam consideradas as que optimizem os custos globais (tanto os custos iniciais decorrentes da edificação dos edifícios, como os custos operacionais decorrentes da sua utilização), levando em consequência a melhores níveis de desempenho térmico dos edifícios e menores consumos energéticos.

A EPBD recast de forma a tornar acessível e prática ao decisor esta metodologia comparativa de soluções, baseia-se na Norma Europeia EN 15459, propondo um método – o Método de Custos Globais. Nesta norma é ainda proposto um outro método, o Método das Anuidades. Ambos permitem obter Custos de Ciclo de Vida (CCV). A norma é direccionada para o cálculo de CCV de sistemas de aquecimento avaliando o desempenho económico das opções construtivas do edifício. O disposto na EPBD recast é uma adaptação de forma a abranger de igual forma a avaliação de medidas de eficácia energética.

2.2 Métodos de Análise de Custo de Ciclo de Vida

Existem diversos métodos para a realização de ACCV, estes com as suas diferentes características conduzem a resultados que não são necessariamente convergentes. Cabe portanto ao decisor, fazer a escolha do método a utilizar, ponderando as diferentes características de cada método, de acordo com o volume de informação sobre o edifício que tem disponível e o grau de detalhe desse volume de informação. Quanto maior e mais detalhada seja a informação, maior será o rigor da ACCV e mais influentes serão os seus resultados.

A informação de custos é fundamental em qualquer ACCV, esta informação é construída com base em diversas variáveis, muitas delas de difícil tangibilidade. Estas variáveis vão desde factores económicos (como taxas de desconto e taxas de inflação), a factores relacionados directamente com as soluções técnicas possíveis. A informação relativa a estas variáveis deriva sobretudo de três fontes [14]:

- informação disponibilizada por produtores, fornecedores, empreiteiros e especialistas;
- informação histórica;
- informação fruto de técnicas de modelação.

No caso de edifícios, dado o seu longo ciclo de vida, a credibilidade da informação reunida depende ainda mais do rigor na recolha de dados e da filtragem realizada a estes, de forma a obter informação válida. Assim, importa reunir e categorizar toda informação disponível, que permita definir com maior exactidão as exigências funcionais do edifício e o seu desempenho ao longo do seu ciclo de vida [14], conforme apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2- Categorias de informação numa ACCV. Adaptado de [14]

Informação referente ao Ciclo de vida de Edifício				
Ocupação:	Físico:	Desempenho:	Qualidade:	Custos:
-Tipo de ocupação; -Funcionalidade; -Horas de utilização.	-Área útil; -Tipo de sistema de aquecimento; -Área de envidraçado; -Paredes e coberturas; -Número de ocupantes.	-Ciclos de manutenção; -Ciclos de limpeza; -Condutividade térmica.	-Elementos sanitários; -Tubagens;	-Aquisição; -Impostos; -Inflação; -Taxa de desconto; -Manutenção; -Operativos; -Limpeza; -Demolição; -Seguros.

A informação possibilita uma maior sensibilidade na análise dos custos, estes em última análise não têm qualquer tipo significado se não forem complementados pela restante informação [10].

Esta correlação entre custos e informação será instrumental para o apuramento bem sucedido do CCV, sendo que, para pôr qualquer método em prática será também necessário detalhar e organizar os custos.

A categorização dessa informação suporta uma diferenciação entre os tipos de custos associados. Os custos distinguem-se então pelo carácter das medidas que representam, ver Figura 2.1, variando a sua designação consoante as características temporais dessas medidas, podendo ser:

- pontuais, no caso de custos que representam medidas únicas e de extensão temporal limitada a um determinado instante do ciclo de vida do edifício (ex: custos iniciais);
- regulares, no caso de custos que representam medidas existentes ao longo de todo o período de ciclo de vida do edifício (ex: custos operacionais);
- ocasionais, no caso de custos que representam medidas em que existe uma indefinição quanto à sua realização, regra geral de extensão temporal curta (custos de substituição);

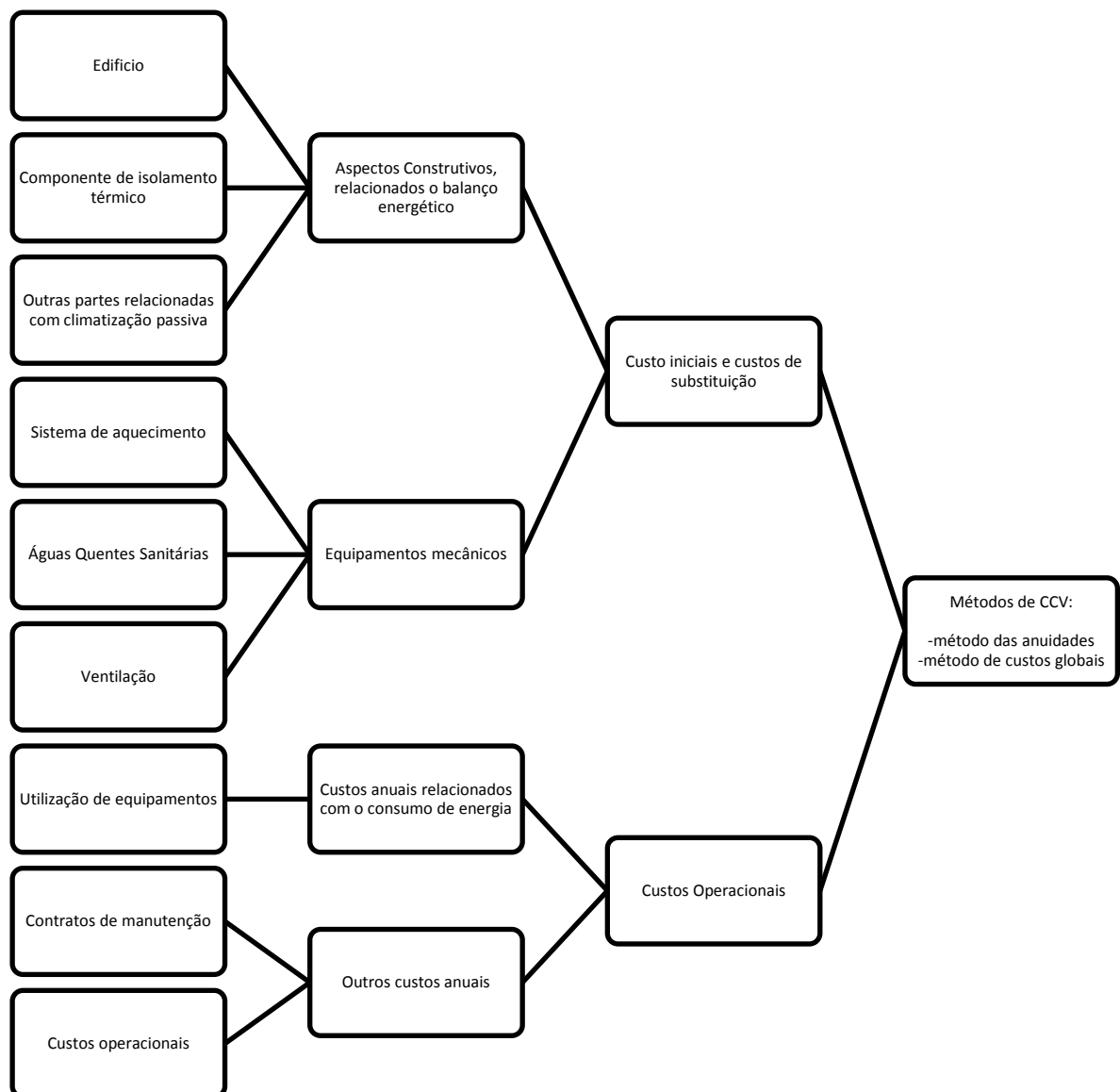


Figura 2.1-Organização de custos. Adaptado de [12]

A EN15459 [15] com vista a obtenção de um valor CCV propõe um processo indicado para ACCV que tem em conta a eficiência energética de edifícios, ver Figura 2.2. O processo começa por averiguar e distinguir tanto a informação relativa a custos como relativa aos elementos projectados para o edifício, distinguindo depois os custos inerentes pelo seu carácter e apresentando, para conclusão do processo de obtenção de CCV, duas alternativas de metodologia de ACCV. O método de custos globais e o método das anuidades.

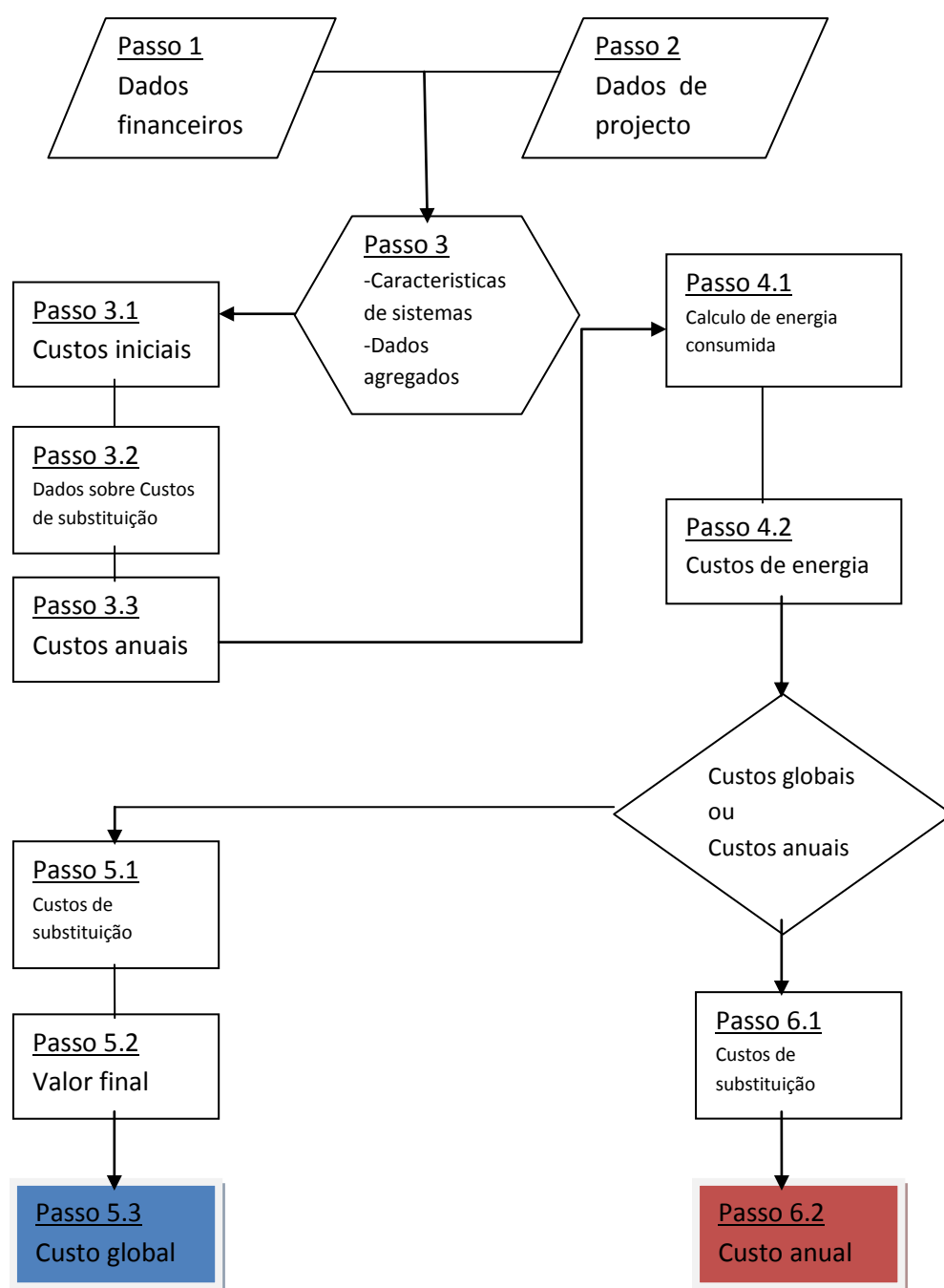


Figura 2.2-Fluxograma de processo dos métodos de Anuidade e de Custo Global. Retirado de [15]

2.2.1 Método de Custos Globais de acordo com EN15459

O Método dos Custos Globais relaciona, através da Equação 2.1, as características fundamentalmente temporais dos diferentes tipos de custos. Estes são afectados em consequência da taxa de desconto respectiva (a taxa de desconto varia em função do período a que se refere o respectivo custo) e uma vez formatados os custos, soma-os num custo global para o período em estudo, designado por Valor Actual Líquido (VAL). O período de estudo poderá ser o tempo de vida estimado da medida, da sua elaboração ao seu fim, ou uma ponderação do tempo útil dessa medida, e nesse sentido, introduz-se na fórmula o desconto correspondente ao valor residual (valor final do objecto após uso). O resultado final, é um custo actualizado ao início do período de cálculo, que tem em conta as diferentes características temporais dos custos ao longo de todo esse período.

$$VAL = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^t \left(C_{a,i}(j) \times R_d(i) \right) - V_{f,x}(j) \right] \quad 2.1$$

Em que:

VAL – custo global, referente a um período de cálculo de t anos, equivalente a Valor Actualizado Líquido

C_I – custos iniciais ou de investimento

$C_{a,i}(j)$ – custo anual do componente j, referente ao ano i (inclui custos operacionais, de manutenção e substituição)

$R_d(i)$ – factor de desconto para ano i (actualiza o valor de um custo futuro para o presente)

$V_{f,x}(j)$ – valor residual de componente j para o final do período de cálculo

$$R_R = \frac{R - R_i}{1 + R_i} \quad 2.2$$

$$R_d = \left(\frac{1}{1 + R_R} \right)^p \quad 2.3$$

$R_R(i)$ – taxa de juro real

$R(i)$ – taxa de juro

$R_i(i)$ – inflação

Faz-se a ressalva que o cálculo, como disposto na EPBD recast, não contempla a inflação, considerando-se a taxa de juro real igual à taxa de juro.

O método usado, ainda que sendo o mais recorrente em modelos de CCV, não permite distinguir alternativas com um período de estudo diferente. Os seus pontos positivos são a capacidade de ter em conta a oscilação do valor dinheiro ao nível temporal e a capacidade de usar toda a informação disponível no seu desenvolvimento.

2.2.2 Método das Anuidades

Como alternativa ao Método de Custos Globais, a EN 15459 apresenta uma outra abordagem, o Método das Anuidades. Enquanto o Método de Custos Globais, corresponde à obtenção do VAL, estimando o custo total para um período de cálculo definido, o Método das Anuidades, também designado em outra literatura como Valor Anual Equivalente (VAE) [7] [16] , transforma todos os custos num custo anual representativo do período de cálculo.

Os diferentes tipos de custos são anualizados através da afectação do factor da anuidade.

$$f_{pv}(n) = \frac{1-(1+R_R)^{-n}}{R_R} \quad 2.4$$

f_{pv} – factor de valor actualizado dependente de factor de desconto

R_R – taxa de desconto real, ver equação 2.2 e 2.3

$$a(n) = \frac{1}{f_{pv}(n)} \quad 2.5$$

a – Factor de anuidade

$$VAE = C_r + \underbrace{\sum_i (a(i) \times \sum_j V_0(j))}_{\text{Custos A}} + \underbrace{a(n) \times \sum_j V_0(j)}_{\text{Custos B}} \quad 2.6$$

i – período inferior a n anos

j – componentes considerados

C_r – custos correntes, já de composição anual (manutenção de sistemas, custos operacionais, custos energéticos, etc)

Custos A – custos anualizados referentes a custos de substituição para componentes cujo tempos de vida sejam inferiores ao período de cálculo.

Custos B – custos anualizados referentes a componentes cujo tempo de vida é superior ou igual ao período de cálculo.

Este método é sobretudo usado de forma a comparar opções de investimento onde o ciclo natural de substituição de componentes não é facilmente relacionável com o período em análise [16]. Não sendo, portanto, condicionante para a sua utilização, alternativas com períodos de cálculo distintos [14]. Por outro lado ao indicar um valor representativo do custo anual, não define o custo exacto para um determinado ano em concreto [14].

2.2.3 Outros métodos de avaliação económica

Período de Retorno

O Período de Retorno, como o nome induz, mede o tempo até reaver os custos iniciais. Serve para avaliar opções alternativas de investimento de forma mais expedita. Pode ser calculado usando valores não afectados por descontos para valores futuros, sendo esse o Método de Período de Retorno Simples, ou afectar os valores futuros com descontos sendo esse o Método de Período de Retorno Descontado [16].

À partida, o Período de Retorno ignora os custos/ganhos, bem como valores residuais, após atingido o valor temporal referente ao retorno dos investimentos iniciais [7]. Sendo possível um projecto com um Período de Retorno menor que outro, ser menos viável do que o alternativo [16].

Não sendo assim um método válido para escolher entre projectos mutuamente exclusivos, vale sobretudo como um método indicativo de projectos com uma componente económica tão evidente que uma ACCV é desnecessária [7].

Ganhos Líquidos

O método de Ganhos Líquidos refere-se aos ganhos operacionais menos o valor actualizado dos custos de investimento para atingir esse nível de gastos. Permite medir o custo efectivo e os benefícios atingíveis através das opções de investimento.

Este método é bastante útil, pela sua intuitividade para comparar diferentes opções de investimento, no entanto, apenas pode ser considerado em situações em que os projectos gerem ganhos ou, de outra forma entendidos, como reduções de custo (poupanças de energia e água) [14] [7].

Rácio de Poupanças por Investimento

O Rácio de Poupanças por Investimento (RPI), como o nome indica, relaciona a propensão de um projecto para ao longo de um determinado período de cálculo, cobrir o investimento feito, fazendo o rácio entre valores actualizados de poupança e o investimento que permite esses níveis de poupança. Quando o RPI é superior a 1, o projecto é assim considerado economicamente viável.

O projecto com o CCV mais baixo não é, na generalidade dos casos, o que apresentará um RPI mais baixo. Por exemplo: a espessura de isolamento térmico numa cobertura, para o caso, com pouca espessura de isolamento térmico o RPI potencialmente será maior do que para uma espessura maior de isolamento térmico, embora o projecto com maior espessura tenha um CCV mais baixo.

O RPI não é portanto o método ideal para escolher entre alternativas que se excluem mutuamente, sendo sobretudo indicado como um valor indicativo para melhor alocação em situações de custos de investimento limitados [7].

2.3 Incerteza e Risco

A definição de um determinado CCV, como foi visto, pode ser bastante susceptível de falhar o seu propósito, uma vez que grande parte da sua composição estrutural está dependente de conjecturas e previsões, e dessa forma de incerteza. A composição dos dados correspondentes ao custo de investimento, ocupação e manutenção é especialmente incerta, quanto maior for o período para o qual a previsão é feita. Tratando-se do sector da Construção, salvo raras excepções, os períodos correspondem muitas vezes a várias décadas.

As maiores fontes de incerteza são [17]:

- Diferenças entre o desempenho real do sistema e o esperado poderem afectar futuros custos de operação e manutenção;
- Poderem ocorrer mudanças nas suposições operacionais provocadas pelas actividades dos utilizadores;
- Futuros avanços tecnológicos poderem vir a apresentar alternativas com custo inferior e, portanto, diminuição da vida económica de qualquer dos sistemas propostos;
- Variações do preço de um recurso importante como energia ou mão-de-obra, relativamente a outros recursos poderem afectar futuras alterações de custos;
- Existência de erros de relações estimativas, taxas de preços para recursos específicos e taxa de inflação nos custos gerais desde a estimativa do tempo à disponibilidade do recurso.

Para que existência do risco e incerteza não diminuam a credibilidade e viabilidade de ACCV, a ponto de a tornar obsoleta, é necessário proceder a uma gestão desse risco/incerteza, devendo-se proceder segundo um processo de três fases: identificar o risco; avaliar o risco em função da sua probabilidade de ocorrência e impacto; tomar medidas apropriadas em resposta, que podem consistir em aceitar, mitigar, transferir ou evitar o risco [16].

De acordo com esse processo, é comum definir duas grandes categorias de análise e avaliação de risco [16]: Qualitativamente, aplicando técnicas de notação subjectiva; Quantitativamente, através de uma abordagem matemática.

Sendo que dentro da avaliação quantitativa existe uma divisão em duas sub-categorias [16]: Probabilística e Determinística.

2.3.1 Método Qualitativo

O Método Qualitativo visa uma observação e avaliação dos riscos existentes numa perspectiva subjectiva e algo simplista do seu impacto. Para cada risco é considerada uma abordagem que factoriza e avalia: a probabilidade desse risco; os afectados por esse risco; a importância de o mitigar;

as acções a pôr em prática. De entre as práticas correntes neste método consideram-se [16]: a elaboração de matrizes SWOT; a avaliação de riscos/incertezas do ponto de vista dos seus efeitos económicos, sociais e culturais; apreciação e comparação de exemplos práticos já existentes.

Este método, pelas suas características, estabelece os pressupostos para posteriores avaliações quantitativas.

2.3.2 Método Quantitativo

O Método Quantitativo parte da formulação de um modelo de forma a calcular os impactos e quantificar o desempenho de medidas na dimensão económica e temporal. Geralmente uma abordagem quantitativa explana melhor os riscos e consequências, sendo no entanto necessário um conhecimento profundo da construção e do contexto em que esta se enquadra.

De entre as várias técnicas possíveis, existem duas, desenvolvidas na ISO15686 Parte 5, que se evidenciam no que diz respeito ao método quantitativo: a análise de sensibilidade pela abordagem determinística e a simulação de Monte Carlo pela abordagem estatística [16].

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade permite averiguar qual ou quais as variáveis que produzem maiores oscilações de resultados e dessa forma são mais cruciais para o projecto. A partir da manipulação dessas variáveis existe também a possibilidade de avaliar o projecto perante diferentes cenários (testando cenários mais pessimistas e/ou optimistas ao esperado, definindo uma margem de erro no projecto).

O processo de uma análise de sensibilidade é então [7]:

- Identificar as variáveis críticas ao projecto;
- Estimar a dimensão de resultados resultantes do teste de vários cenários;
- Testar cenários alternativos.

A maior vantagem da análise de sensibilidade é a sua acessibilidade em termos de sofisticação tecnológica, sendo a sua maior desvantagem o facto de não definir das várias alternativas a melhor, embora resuma as melhores alternativas [7].

Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo, como método probabilístico, associa a cada variável do CCV uma distribuição de incerteza, combinando dados estatísticos para o efeito, o que permite escalar os

resultados finais. A sua utilização adequa-se a situações em que os problemas não têm tangivelmente uma única solução [18].

A simulação Monte Carlo tipicamente gera gráficos em que [16]:

- Demonstra as probabilidades dos CCVs, para um período de estudo, não excederem determinados valores;
- Demonstra a distribuição dos CCVs, indicando o CCV mais provável;
- Identifica os riscos/causas com o maior impacto final no CCV.

A decisão de quão é aceitável ou não a probabilidade de um dado efeito merece sempre uma análise cuidada, considerando para isso variáveis não tangíveis como sejam as repercussões das medidas consideradas, numa perspectiva social, cultural ou ambiental. Sendo assim necessário, para quem decide, uma análise subjectiva de ponderação das alternativas e da viabilidade de opções associadas às suas probabilidades, estando assim omnipresente um grau de subjectividade na decisão [18].

2.4 Espessura óptima de isolamento térmico

Uma das análises mais recorrentes, no campo da térmica de edifícios, é inquirir a chamada espessura óptima de isolamento térmico a aplicar numa solução de envolvente opaca de edifício. Esta análise assenta no processo físico de que, face a um diferencial de temperatura entre o interior de um edifício e o exterior, se gera um fluxo de calor que por condução se direcciona para o ambiente mais frio. Com base nisto, na estação de aquecimento, é feito uso de sistemas de aquecimento, de forma a contrariar o fluxo de energia para o exterior com a produção de calor. Como é conhecido, o isolamento térmico provoca uma redução desse fluxo, possibilitando uma maior estabilidade térmica entre os dois ambientes.

Assim, esta análise avalia, segundo critérios que podem ser económicos ou ambientais, a dicotomia entre a capacidade de manter calor num dado ambiente (isolamento térmico) e a capacidade de produzir calor, de modo a que a sua produção equilibre as perdas térmicas (sistema de aquecimento).

A espessura óptima corresponde ao ponto em que o balanço entre impacto do isolamento térmico da solução e o nível de produção de sistema de aquecimento, dependendo dos critérios (maioritariamente económicos), atinge um impacto mínimo. Com maior recorrência, a análise parte de uma necessidade de avaliar o mínimo impacto económico e desta forma são avaliados os custos de instalação do isolamento térmico (crescentes com a espessura) e os custos inerentes ao aquecimento do espaço (decrecentes com a espessura) com vista a obter a solução com o melhor custo-benefício.

A avaliação de espessuras de isolamento térmico, que em função do custo de aplicação e consequente poupança energética, permite atingir um mínimo óptimo, tornando-se então um

paradigma a colocar sobretudo em edifícios de grande dimensão em que o potencial de poupança não propicie displicência.

As primeiras análises neste sentido remontam a 1940 [19], não se tendo então ainda em conta o gás natural e a electricidade como combustíveis para aquecimento. Posteriormente, em 1965, é referido que: “Cada polegada adicional de isolamento térmico introduzida, provoca uma poupança menor do que a polegada anterior, até ser atingido um ponto, em que a poupança corresponde ao custo de instalação da última polegada de espessura de isolamento térmico. Este é o limite económico, e a espessura de isolamento térmico correspondente a este limite é designada por espessura óptima de isolamento térmico” [20]. O autor desenvolve esta ideia, isolando à data as principais variáveis à definição de espessura óptima de isolamento térmico: custo do combustível, custo do sistema de aquecimento, custo da instalação do sistema de isolamento térmico.

O método proposto pressupunha desde logo que a espessura óptima de isolamento térmico aplicada seria o mínimo da função que somasse o custo inerente ao isolamento com o custo associado ao combustível, como demonstrado na Figura 2.3.

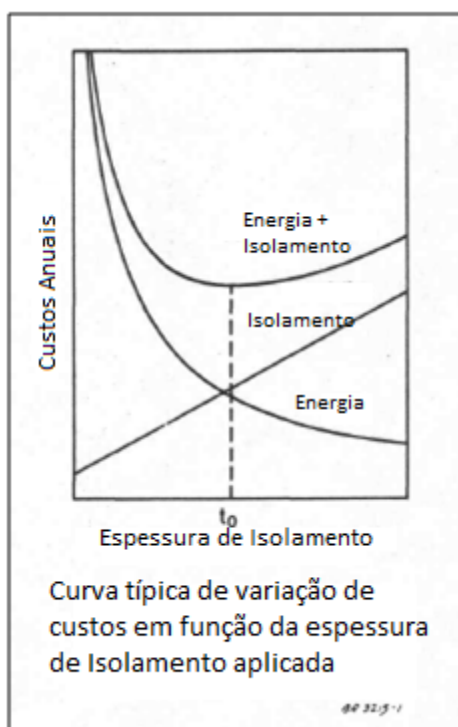


Figura 2.3-Gráfico de espessura óptima de isolamento térmico [20]

Este método [20], baseado na definição de graus-dias de aquecimento, não fazia distinção técnica entre elementos construtivos, contudo dava desde logo grande importância às variáveis económicas e energéticas, nomeadamente a evolução do custo de combustível e a evolução do custo do dinheiro.

A construção apresentada assumia desde logo pressupostos simplificativos, nomeadamente na construção de custos que davam margem a posteriores abordagens mais detalhadas. No entanto, no que toca às condicionantes físicas, o método tem um carácter que permite resultados válidos para

cenários tecnologicamente mais avançados. É exemplo disso a evolução da condutibilidade térmica dos materiais isolantes.

Surgiram posteriormente, mais estudos que exploram o mesmo conceito adaptando-o à conjuntura em que os respectivos autores se encontram ou visam explorar. Nomeadamente, espessuras óptimas de isolamento térmico para climas diferentes [21] [22] [23], para diferentes soluções construtivas de envolvente opaca [21] [24], para diferentes materiais de isolamento térmico [22], para diferentes tipos de fonte de aquecimento e diferentes eficiências de sistemas de aquecimento [22] [25]. Existem ainda estudos que verificam o efeito de determinadas condições, como sejam a orientação solar do elemento construtivo [26] ou o efeito que diferentes direcções do vento provocam [27].

Em Portugal, o RCCTE, enquanto modelo estático de simulação de comportamento térmico, permite-nos uma consideração das medidas acima mencionadas, equacionando a forma geométrica do edifício e a sua inércia térmica, de forma a estabelecer um valor nominal de necessidades de aquecimento. É ainda dada a indicação de valores mínimos de resistência térmica, para zonas de pontes térmicas e zonas da envolvente opaca correntes, estes eliminam incoerências construtivas. Evita-se portanto situações em que, embora o edifício respeite e tenha necessidades de aquecimento com valores abaixo dos nominais, comporte valores de resistência térmica, que localmente potenciassem pontes térmicas e anomalias.

De facto a nível regulamentar, é a capacidade de transmissão de energia atrás referida de elementos da envolvente, que maior impacto tem no desempenho energético do edifício e mais pesa na análise quantitativa da sua necessidade de aquecimento. Como tal, a tecnologia construtiva de isolamento do edifício e a qualidade dos elementos dos vãos envidraçados assumem especial preponderância nesta análise [28].

O interesse da análise de espessura óptima de isolamento térmico torna-se acrescido, quando face a resultados, economicamente óptimos, se comparam com os valores regulamentares existentes para determinada localização. Estudo semelhante foi efectuado pela ECOFYS, de forma a identificar a assertividade dos regulamentos dos estados membros quanto a espessuras de isolamento térmico ideais na sua envolvente [29]. O estudo, partindo de cenários energéticos e previsões macroeconómicas, e graus-dias de aquecimento e arrefecimento (neste caso calculados para uma temperatura ambiente de 18°C, diferente de RCCTE) , avalia, segundo a dimensão de custo energético e custo inerente ao incremento de espessura de isolamento térmico, a solução óptima para um conjunto de cem cidades, representativas dos diferentes climas dos estados membros, e a respectiva diferença em termos de coeficientes de transmissão térmica, para o regulamentado nos locais considerados [29], ver Figura 2.4.

A simulação das necessidades de aquecimento feita através de método dinâmico de simulação de comportamento térmico, põe a descoberto que os limites regulamentares de U (coeficientes de transmissão térmica) para paredes envoltantes e coberturas nos respectivos países têm valores, regra geral, inferiores àqueles que corresponderiam a um menor custo associado, os chamados valores óptimos de espessura óptima de isolamento térmico [29].

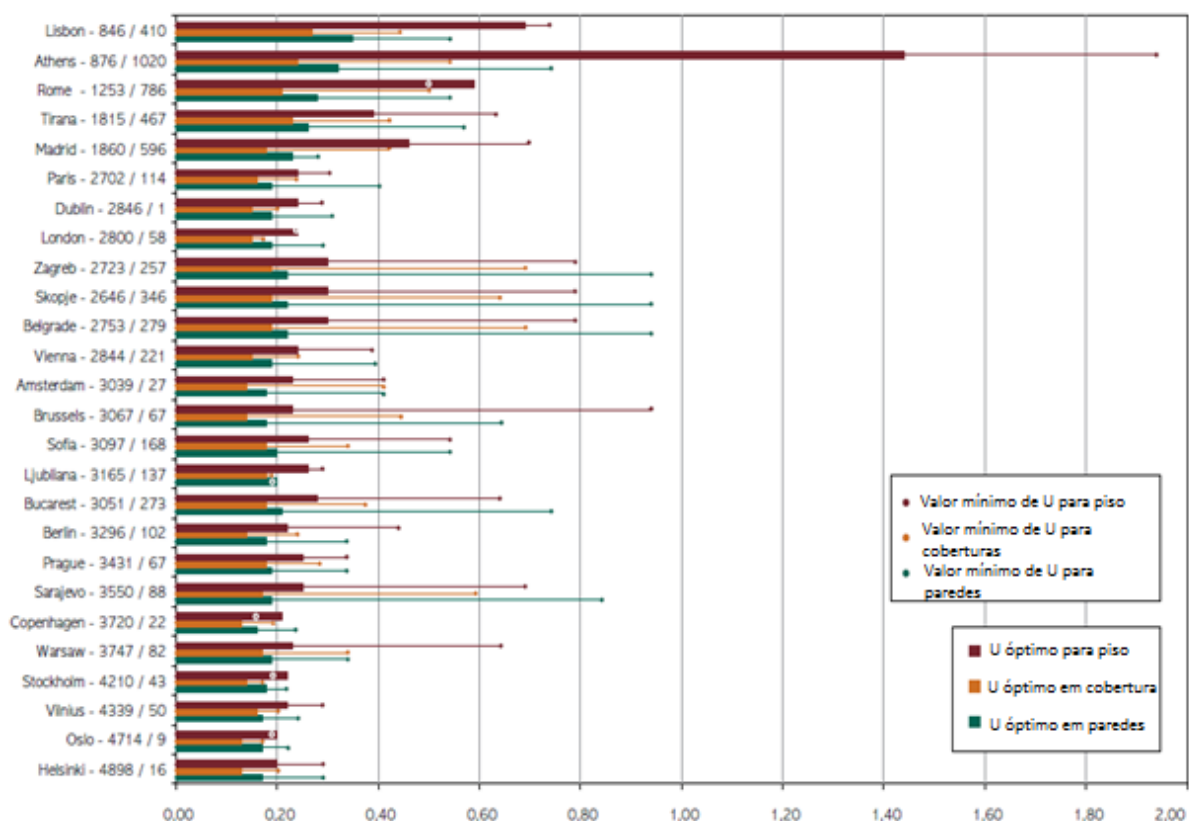


Figura 2.4-Diferenças entre U óptimo e U regulamentado para diferentes cidades europeias [29]

Como referido, esta análise mede o menor impacto, recorrentemente económico, da combinação entre isolamento térmico e sistema de aquecimento. Esta análise ainda assim permite, seguindo um critério ambiental, averiguar a solução óptima correspondente a um menor impacto ambiental. Num estudo Alemão explorando-se sobretudo o impacto ambiental e tendo em conta diferentes sistemas de aquecimento, desde estado-de-arte a mais convencionais, é avaliada, para diferentes cenários energéticos, a espessura óptima de isolamento térmico [30]. Como resultado temos espessuras bastante diferentes, o que é revelador do quanto a energia, o seu preço e os impactos que lhe estão inerentes, são elementos importantes, no cada vez mais importante processo de poupar energia e ser ambientalmente consciente [31].

3 Casos de estudo

3.1 Caracterização de casos de estudo

A Comissão Europeia através EPBD, prevê no anexo III, que de forma a ser incrementada uma metodologia comparativa para a obtenção de níveis óptimos de rentabilidade, os Estados-Membros definam “edifícios de referência caracterizados e representativos pela sua funcionalidade e localização geográfica”. Nestes edifícios de referência devem-se incluir “edifícios residenciais e não residenciais, tanto novos como já existentes” [3]. Posteriormente é acrescentado, por meio do Regulamento Delegado nº244/2012 no anexo I ponto 4, que os edifícios de referência definidos (no mínimo um para edifícios novos e dois para edifícios existentes) “podem (ainda) ser definidos com base em subcategorias de edifícios (diferenciados por dimensões, idade, estrutura de custos, materiais de construção, padrões de utilização ou zonas climáticas) que tenham em conta as características do parque imobiliário nacional” [32]. Num documento posterior de orientações complementares ao Regulamento Delegado nº244/2012 (Jornal Oficial da União Europeia C115) é feita a referência a websites ^{1 2} onde já existem catálogos e bases de dados de edifícios de referência para diversos Estados-Membros. Nestes Portugal ainda não dispõe de exemplos de edifícios de referência.

Baseado no conceito de edifício referência, como edifício representativo do parque habitacional, importa então considerar o que as estatísticas revelam de forma a definir os casos de estudo a utilizar.

Em Portugal, segundo dados de 2011, 39,4% dos edifícios são de um piso e outros 45,5% de dois pisos [33] perfazendo um número total de 3.007.616. É ainda feita referência ao facto de que entre 2001 e 2011 o aumento de edifícios de dois pisos correspondeu a mais de metade do aumento total de edifícios. Estes têm, desde a década de 70, uma representação muito próxima dos 50% quanto ao parque edificado [34].

Dos considerados, 87,2% são edifícios de um alojamento, podendo ser designados unifamiliares. Estes tiveram um aumento relativo de 12,4% (+342 095) face ao aumento de 10,3% (+42 251) de edifícios com 2 ou mais alojamentos [34].

Quanto à forma de implantação, apenas inquirida para edifícios de um ou dois pisos, cerca de 60,5% correspondem a edifícios isolados, 22,7% edifícios em banda e 16,8% edifícios geminados [34].

Tendo por base estes dados, foram considerados quatro diferentes casos de estudo (quatro edifícios unifamiliares): dois deles de um piso (casos I e II) e dois com dois pisos (casos III e IV) . Para os diferentes números de pisos correspondem a duas formas distintas de implantação: isolada e geminado a norte .

¹ <http://www.building-typology.eu/tabula/download.html>

² <http://www.asiepi.eu/wp2-benchmarking/reports.html>

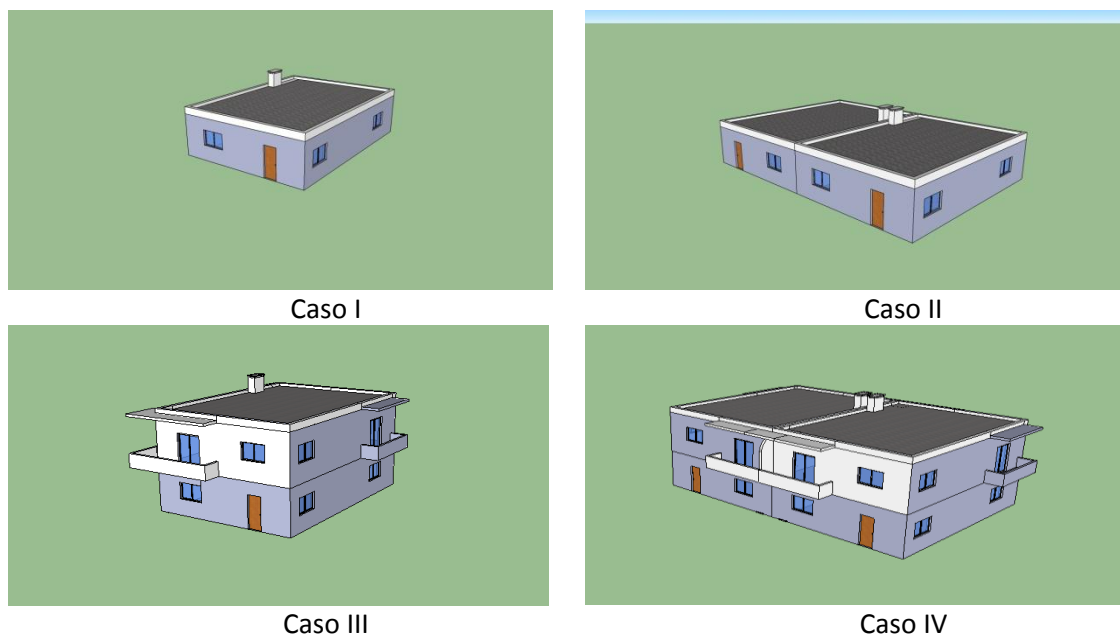


Figura 3.1-Representação esquemática de Casos de estudo

Área útil

Em termos de área útil, os casos de estudo têm $94,8\text{m}^2$ e $189,7\text{m}^2$ respectivamente para os edifícios com um piso (casos I e II) e com dois pisos (casos III e IV). As áreas utilizadas estão dentro de valores estilizados, sendo que 19,9% correspondem a área útil de $80\text{-}99\text{m}^2$ e 9,3% a área útil de $150\text{-}190\text{m}^2$. A última característica evidencia uma tendência de aumento de casas com mais de 150m^2 , com um aumento de aproximadamente 100% desde 1991 até a 2011, na sua percentagem de distribuição de alojamentos familiares clássicos, conforme apresentado na Figura 3.2.

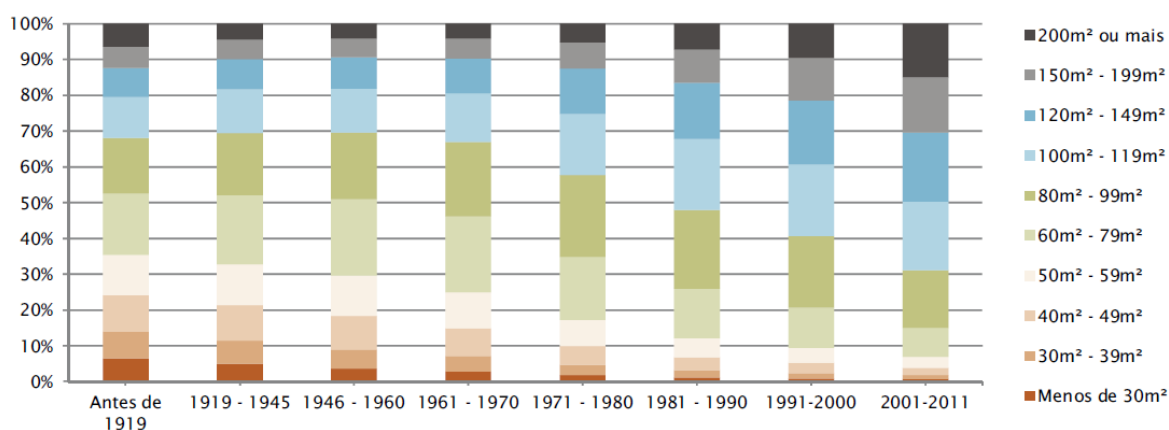


Figura 3.2- Distribuição de alojamentos familiares clássicos, ocupados com residência habitual, segundo o escalão de área útil, por época de construção do edifício, Retirado de [33]

Orientação

Quanto à exposição solar, não existem registados dados que permitam a consideração de determinada orientação representativa a emular nos casos de estudo e como tal os edifícios terão um desenvolvimento em comprimento segundo um eixo Este-Oeste de forma a que as fachadas de maior extensão estejam voltadas a Norte e a Sul. Nos casos de estudo consideram-se ainda a inexistência de quaisquer elementos de obstrução que reduzam a incidência de luz solar.

Condições climáticas

De modo a possibilitar uma análise dos elementos em estudo segundo a variável climática, foram consideradas três zonas climáticas de Portugal Continental distintas.

Sendo o estudo referente a necessidades de aquecimento, e portanto, cingindo as suas características à estação de aquecimento, foram considerados concelhos de Portugal Continental, que representem as diferentes zonas climáticas de Inverno definidas no RCCTE. Assim Almada representando a zona climática I1, Porto a zona climática I2 e Bragança a zona climática I3, ver Quadro 3.1.

Quadro 3.1-Variáveis climáticas das localizações em estudo, segundo o RCCTE

	Zona Climática	Nº Graus-dias (GD) (°C.dias)	Duração estação aquecimento (M) (meses)	Energia solar ³ (G _{sul}) (kWh/m ² .mês)
Almada	I1	1160	5,3	108
Porto	I2	1610	6,7	93
Bragança	I3	2850	8,0	90

Características construtivas

Em termos estruturais, todos os quatro casos correspondem a edifícios de estrutura em betão armado porticada, estes representam a nível nacional 48,6% dos edifícios clássicos existentes. Desde a sua introdução em Portugal que o betão armado enquanto elemento estrutural teve “aumento progressivo e acentuado” [33], estando historicamente ligado ao aumento do nível de pisos por edifício. Por cerca de 1980 houve um princípio de descontinuação da construção de estruturas de paredes de alvenaria com placa [35], que juntamente com outros tipos de estrutura já consideradas tecnologicamente ultrapassadas, prenunciavam uma tendência em número decrescente para estas estruturas, ver Figura 3.3. No entanto, existem ainda regionalmente grandes oscilações em termos de representação de estruturas em betão armado, que são explicadas em parte por conjunturas sócio-económicas, movimentos migratórios e aumento das áreas metropolitanas na segunda metade do século XX [33]. E, embora actualmente, ganhem já alguma notoriedade outros tipos de estruturas

³ média mensal de energia solar incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento

(paredes de alvenaria de adobe) têm ainda uma representação residual quando comparadas às estruturas de betão armado, como demonstrado na Figura 3.3.

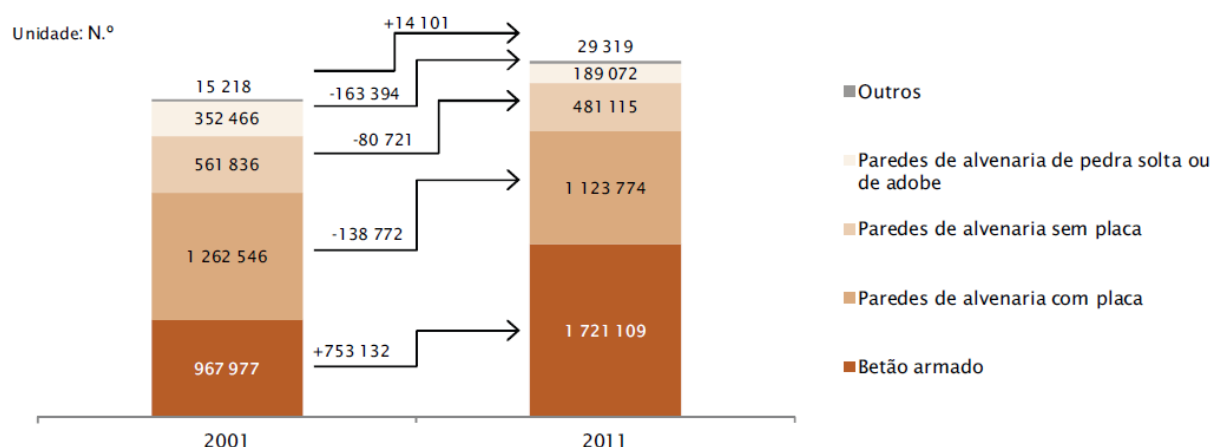


Figura 3.3- Número de edifícios clássicos segundo o tipo de estrutura de construção. Retirado de [33]

Paredes exteriores

A tipologia das paredes exteriores tem de forma recorrente sido alterada, e ainda que as tipologias utilizadas tenham uma expressão temporal algo difusa, é possível de certa forma generalizar e fazer corresponder determinadas tipologias a períodos em que a sua expressão foi maior ou pelo menos mais evidente. Ver Figura 3.4.

Com os casos de estudo pretende-se representar uma situação de um edifício da década de 1980-1990 em que a opção construtiva não se compadeceu com a solução, à data, mais actual e como tal a paredes da área envolvente correspondem a paredes de um pano de alvenaria tijolo cerâmico. Posteriormente é considerada uma sobreposição desta mesma parede com um sistema Compósito de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS) de forma a possibilitar a análise do incremento de espessura de isolamento térmico.

O sistema de forma genérica é constituído pelo suporte de um pano de alvenaria simples, que poderá ser de tijolo, blocos de betão, pedra ou elementos estruturais em betão armado. Ao suporte são fixadas e/ou coladas as placas de isolamento térmico rígidas como placas de EPS, de XPS ou de ICB, ou semi-rígidas como placas de MW. O posterior revestimento de acabamento é passível de ser espesso, de ligantes minerais (com espessuras entre 1mm a 2 mm), ou delgado, de ligantes sintéticos ou mistos (com espessuras entre os 5mm e os 10mm), em que ambos são imperativamente armados (sendo nos casos mais recentes usada rede de fibra de vidro por oposição a redes de metálicas usadas nas primeiras soluções de ETICS). É então aplicado um primário composto de uma dispersão aquosa de resinas sintéticas de forma a permitir regular a absorção e conferir a aderência necessária à camada de acabamento. Por fim, é aplicada uma camada de acabamento composta por um revestimento plástico espesso com fins decorativos e de incremento de estanquidade à água.

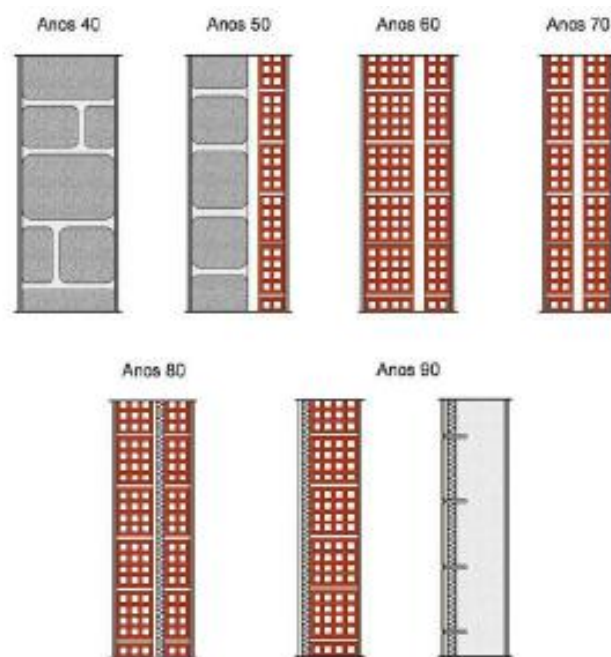


Figura 3.4- Evolução histórica, desde os anos 1940's, das paredes em Portugal. Retirado de [36]

Pelo facto do isolamento térmico ser aplicado exteriormente, existe o benefício de serem corrigidas as pontes térmicas, melhorando-se assim o desempenho térmico do edifício, o que resulta numa diminuição do consumo energético. Consequentemente são reduzidas ou evitadas condensações interiores, melhorando-se a qualidade do ar interior (inibição de desenvolvimento de fungos) e é conferida ainda protecção da estrutura e alvenaria face a choques térmicos o que, se reproduz num aumento de durabilidade destes elementos.

Ainda, as paredes por serem isoladas exteriormente conferem uma maior inércia térmica ao edifício, pois embora constituídas por um só pano, o isolamento permite que a maior parte da massa da parede contribua para a inércia térmica do edifício. Esta solução comporta um menor peso de paredes para a estrutura e disponibiliza uma maior área útil ao edifício.

Este sistema apresenta, quando comparado com outras soluções, uma elevada sustentabilidade face não só ao seu comportamento como ao seu custo de aplicação, custo de manutenção e facilidade de execução. É por isso considerada como a solução construtiva que “corresponderá a uma evolução expectável para a envolvente vertical opaca exterior dos edifícios” [37], como se verifica na Figura 3.5. Em análise comparativa de diferentes soluções construtivas de paredes exteriores, com valores idênticos de U, o sistema ETICS foi o de menor custo total e de rentabilidade óptima [38].

Este sistema comporta contudo alguma fragilidade face a choques, fendilhação por variações termo-higrométricas e reacção ao fogo. Como tal, o sistema é sujeito a diversos ensaios que visam monitorizar o seu comportamento e obter uma aprovação [39]. Devido ao cariz da solução, a sua aplicação é ainda bastante difícil em situações de não planeza do suporte.

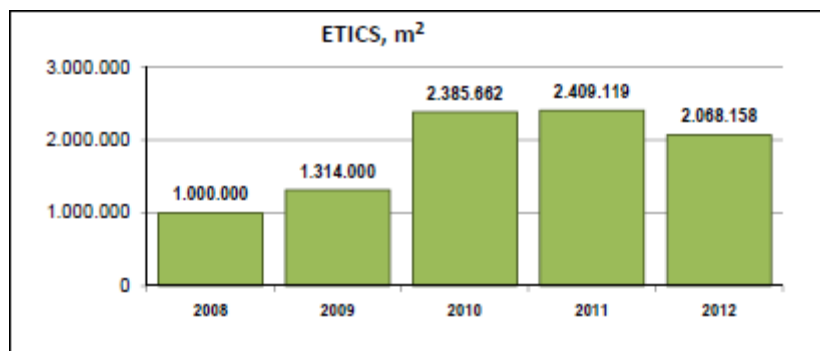


Figura 3.5-Metros quadrados de ETICS instalados (Dados APFAC)

Na Alemanha, uma vez que existem casos de aplicação de ETICS que remontam aos anos 60, foi confirmado um comportamento prolongado bastante satisfatório destes sistemas. Na maior parte dos casos, apenas existiam apontamentos de colonização biológica inconsequentes. Assim, neste estudo é avançado uma duração de 20-30 anos, dependendo das características do revestimento de acabamento, mineral (30 anos) ou orgânico (cerca de 20 anos), embora a sua longevidade possa vir a ser maior, face aos avanços técnicos na sua concepção [40].

No caso de Portugal, feitas as devidas ressalvas face aos diferentes climas e de acordo com um levantamento estatístico, existe a indicação de que para sistemas com mais de 15 anos começam a aparecer as primeiras anomalias relacionadas com a idade [41].

Cobertura

Na solução do sistema de cobertura optou-se por uma cobertura plana tradicional, de forma a possibilitar a avaliação para o material de isolamento térmico escolhido, o EPS.

Sendo um material de porosidade aberta, seria errado considerar uma cobertura plana invertida, muito embora seja esta solução a que apresenta uma maior aplicação, devido sobretudo a vantagens de desempenho que lhe se são reconhecidas, quando em comparação com um sistema tradicional. Assim, em comparação, o sistema tradicional apresenta face ao sistema invertido um desgaste mais acelerado de revestimento de impermeabilização. Existe também uma maior probabilidade de ocorrência de condensações internas, devido ao posicionamento do isolamento térmico sob o revestimento de impermeabilização [42]

Importa referir, que pela sensibilidade do EPS ao contacto com solventes e sistemas aderentes por calor, no caso betumes, a opção foi considerar o isolamento térmico numa posição intermédia entre a camada de forma e a laje.

O suporte da solução será uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos, sobre a qual é aplicada uma camada de regularização. Posteriormente, será colocada uma barreira ao vapor, para o caso uma folha de PVC e de seguida colocadas as placas de isolamento térmico, sobre estas será então elaborada a pendente através da camada de forma constituída por um betão leve com agregados de argila expandida. O revestimento de impermeabilização aplicado sobre a camada de

forma, será constituído por duas camadas de betume polímero APP, ambas armadas, com densidades de 3kg/m² para a inferior e 4kg/m² para a superior, sendo esta revestida na sua face superior com auto-protecção de granulado mineral. Sob a estrutura de suporte será aplicada uma camada de reboco de argamassa de cimento e um revestimento em estuque.

Quadro 3.2-Classificações de cobertura

Classificação quanto a:

Acessibilidade	Não acessível (de acesso restrito)
Camada de protecção de impermeabilização	Protecção leve (auto-protecção de fábrica de granulado mineral)
Revestimento	Não tradicional (membranas de betume polímero APP)
Estrutura resistente	Rígida continua (laje aligeirada de betão armado)
Pendente	Classe II (UEAtc) – pendente permite escoamento de água e aplicação de protecção pesada

O Quadro 3.3 resume assim alguns dados sobre características dos casos considerados.

Quadro 3.3-Características dimensionais dos casos de estudo

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Pisos	1		2	
Área útil (m²)	94,875		189,75	
Pé direito (m)	2,75			
Volume (m³)	260,91		521,81	
Área de envolvente vertical opaca (m²)	109,85	75,05	216,7	147,1
Área envidraçada – Norte (m²)	0,7	/	1,4	/
Área envidraçada – Sul (m²)	3	3	7,5	7,5
Área envidraçada – Este (m²)	3	3	7,5	7,5
Área envidraçada – Oeste (m²)	1,5	1,5	6	6
% Área envidraçada por área de parede exterior	6,77%	8,77%	5,87%	7,89%
Factor de Forma	0,83	0,69	0,64	0,51

Vãos envidraçados

Os vãos envidraçados evoluíram bastante ao longo das últimas décadas, seja pela evolução de novos materiais de caixilhos, seja pelo melhoramento das características dos vidros, seja até pelo melhoramento da configuração e design de todos os elementos constituintes. A resposta às exigências funcionais que lhes são requeridas é assim cada vez mais conseguida. Em Portugal, apenas à relativamente pouco tempo começou a ser prática corrente a consideração de vãos envidraçados com tecnologia mais avançada, sendo uma possível explicação para isso o facto do clima moderado e do preço inibirem a viabilidade de soluções mais avançadas ou em estado-de-arte.

Os vãos envidraçados enquanto elemento da envolvente de edifícios permitem a transmissão de calor entre o interior e o exterior, por meio de três fenómenos físicos distintos: condução, convecção e radiação.

O fenómeno de condução é a transmissão de energia térmica entre as partículas constituintes (átomos e moléculas) de um meio, na presença de um diferencial térmico. A energia é transmitida pela vibração dessas partículas de meios onde a energia térmica é maior para meios onde a energia térmica é menor. A capacidade para este fenómeno ocorrer depende da condutibilidade do meio, num meio em que a condutibilidade térmica seja alta existe maior vibração de partículas e maior transmissão de energia térmica, num meio com menor condutibilidade térmica ocorre o inverso [43].

De forma a quantificar o fluxo de energia térmica por condução através de dois ambientes distintos em que existam um ou mais elementos entre eles, calcula-se o coeficiente de condutibilidade térmica (U) do conjunto desses elementos. Este valor considera o fluxo de calor transmitido através de um metro quadrado para um diferencial de um grau Célsius (ou Kelvin) de temperatura.

As perdas/ganhos por condução representam grande parte das trocas de energia térmica que ocorrem num edifício. Assim, para o cálculo de necessidades energéticas é de grande importância considerar os valores de U dos elementos de envolvente do edifício, entre os quais o U dos vãos envidraçados. O coeficiente de transmissão térmica de vão envidraçado U_w varia segundo as dimensões que caixilhos e vidros têm e dos respectivos valores de U desses elementos, variando ainda devido ao coeficiente de transmissão térmica linear para o envidraçado em causa. A norma EN673 [44] apresenta uma fórmula que pondera essas variáveis de forma a obter U_w de um determinado vão envidraçado:

$$U_w = \frac{U_g \times A_g + U_f \times A_f + L_g \times \Psi_g}{A_g + A_f} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad 3.1$$

Em que A_g e A_f correspondem às áreas de vidro e caixilharia. O U_g e U_f correspondem aos coeficientes de transmissão térmica de vidros e caixilharia (valores fornecidos pelo fabricante). L_g é a comprimento da intersecção entre vidro e caixilho e Ψ_g o coeficiente de transmissão térmica linear. Este último tem em conta os efeitos térmicos do vidro, as características do elemento espaçador entre vidros com mais de uma folha e design da caixilharia na intersecção.

O fenómeno de convecção é um mecanismo resultante da condução entre partículas em simultâneo com um movimento de um fluido (líquido ou gasoso). Como resultado da convecção criam-se campos de temperaturas. Existem dois tipos de convecção: a natural e a forçada. A convecção

natural ocorre perante a existência de um gradiente térmico tendo como efeito uma redução do peso específico da matéria. A convecção forçada ocorre devido à existência de um diferencial de pressões, fruto de uma causa externa [43]. Este fenómeno ocorre junto as faces do vidro e no meio dos panos, nos vidros duplos e triplos. Na face interior a convecção dá-se pelo contacto do ar interior com uma temperatura mais reduzida da face do vidro, podendo-se combater este efeito com a utilização de meios de aquecimento junto as faces. Entre panos a convecção que ocorre cria campos de temperatura favoráveis à perda de calor, existe para face isso a possibilidade de preencher esta zona com um gás de preenchimento de menor viscosidade reduzindo a ocorrência desses mesmos campos [43].

O fenómeno de radiação consiste na emissão e recepção de ondas electromagnéticas entre dois corpos a temperaturas diferentes sem que seja necessária a existência de um meio entre eles. A emissão destas ondas é tanto maior quanto maior for a temperatura do corpo. A esta radiação designa-se como radiação de longo comprimento de onda (entre os 3 e os 50 μ m), é sobretudo radiação infra-vermelha e é proporcional à emissividade dos corpos. Existe ainda a radiação de curto comprimento de onda (entre os 0,3 e 2,5 μ m) originária da radiação solar [43].

Existe actualmente a possibilidade de limitar, nos envidraçados, a recepção de radiação de longo comprimento de onda, através da aplicação na face exterior do vidro de películas de baixa emissividade.

Para aferir da melhor forma o desempenho de um vidro existem, para além do coeficiente de transmissão térmica, dois importantes indicadores a ter em conta: a transmitância do vidro e o seu factor solar. Estes dependem directamente do como se decompõe a radiação ao incidir no vidro. A radiação pode ser reflectida pelo vidro, transmitida para o seu interior e absorvida pelo vidro. Na figura seguinte pode-se visualizar que da radiação incidente I , o produto da radiação I com a reflectância (ρ_s) resulta na radiação reflectida. A radiação que é transmitida para o interior é igual ao produto da radiação total com a transmitância (τ_s). A radiação absorvida é igual ao produto da radiação incidente com a absorptância (α_s), desta radiação parte volta para o exterior e parte volta para o interior, ver Figura 3.6.

O factor solar corresponde ao quociente entre o ganho de calor por radiação através do vidro e o total da radiação incidente. Este valor regra geral tende a diminuir com a evolução técnica do vidro, vidros com mais panos tendem a ter um menor factor solar, reduzindo-se portanto os ganhos energéticos para o edifício.

A transmitância, como referido anteriormente, indica a capacidade do vidro permitir a passagem de determinada radiação, podendo ser esta de comprimento de onda longo ou comprimento de onda curto.

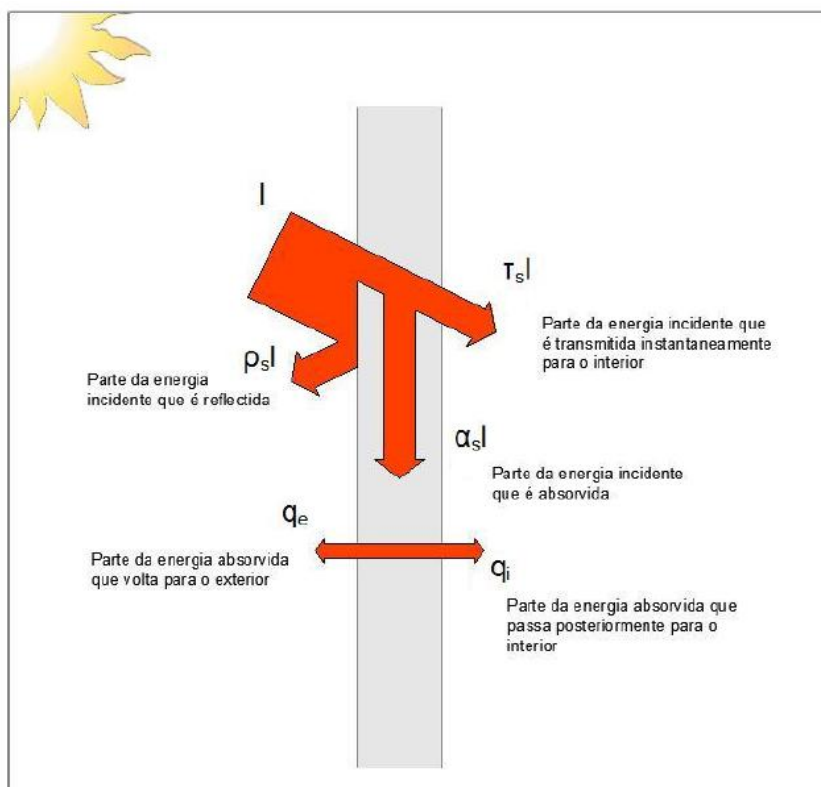


Figura 3.6-Decomposição da radiação incidente num envidraçado [45]

Para além de regular características físicas das janelas como o peso, o design, etc, as caixilharias têm também um papel importante de controlo térmico. Historicamente, os primeiros caixilhos foram de madeira. Este material embora tenha a seu favor a sua trabalhabilidade (aumento a gama de formatos disponível) e ser um material com boa estabilidade dimensional, tem uma fraca durabilidade requisitando bastante manutenção.

Com aparecimento da indústria do alumínio, este material teve uma exponencial aceitação para o fabrico de caixilhos. A sua leveza, durabilidade, não corrosividade e facilidade em ser extrudido são as suas principais qualidades enquanto material para caixilharia. Este é também um material que permite uma reciclagem pouco dispendiosa conferindo-lhe um custo de ciclo de vida, regra geral, inferior a restantes elementos. Por outro lado o facto de apresentar elevadas condutibilidades térmica é uma grande desvantagem, peso embora se consigam reduções significativas das suas perdas térmicas através da inserção de uma ruptura de ponte térmica nos seus perfis.

O PVC, destes materiais o mais recente, teve nos últimos anos uma grande evolução. Desde início do seu uso em caixilharia que lhe são reconhecidas a sua boa capacidade de isolamento térmico e a sua alta resistência ao impacto. Contudo tinha uma elevada dilatação térmica e grande degradação devido à radiação ultra-violeta, com problemas óbvios para a sua utilização como caixilharia. Actualmente estes contras têm vindo a ser melhorados, encontrando-se hoje caixilharias em PVC já com aceitável resistência a estes dois factores.

Para este trabalho foram considerados três diferentes tipos de vãos envidraçados: um primeiro com vidro simples e caixilharia tradicional em alumínio e outros dois com vidros duplos de diferentes comportamentos térmicos e com caixilharia de PVC de elevada resistência térmica.

Na aferição dos seus U_s não é considerada a existência de dispositivos de oclusão nocturna.

Em anexo são calculados os valores U_w dos vãos envidraçados de vidro duplo seguindo o método de referido na norma EN673, sendo o envidraçado de vidro simples obtido por consulta do ITE50.

4 Análise de Custo óptimo aplicado aos casos de estudo

4.1 Metodologia de Cálculo

A solução energética para um edifício, resultando da confluência de medidas e respectiva eficiência, é função das variáveis associadas a cada uma das medidas que compõem a solução, sendo necessário avaliar as medidas segundo dois vectores: impacto energético e impacto económico.

De forma a proceder a análise de custo-óptimo, importa distinguir entre custos associados às medidas de climatização passiva, neste caso espessura de isolamento térmico e vãos envidraçados, e custos associados à energia necessária para aquecimento. A soma destes custos corresponde a um custo total representativo da solução em estudo, existindo uma relação de proporcionalidade inversa, uma vez que um aumento em termos de desempenho térmico das primeiras, resulta numa diminuição do gasto em energia para aquecimento e vice-versa.

Os custos correspondem a um diferencial monetário face a uma situação referência. Esta, em si mais básica e tecnicamente mais pobre, faz caso de situações em que as soluções mais ortodoxas não são aplicadas, situações no limite ou mesmo abaixo dos níveis regulamentares que por certo cada vez menos comuns, validam o seu estatuto de referência pelo facto de ainda assim ocorrerem. A situação referência é então estabelecida, não pelo facto de ser um mínimo regulamentar, mas por corresponder ao estrato mais baixo no que se refere a soluções construtivas com o cuidado térmico de edifícios. A situação referência pressupõe a inexistência de isolamento térmico nas soluções da envolvente opaca vertical e cobertura. Assim, para o cálculo das respectivas necessidades de aquecimento, são consideradas soluções de ETICS e de cobertura não-invertida sem a integração do elemento isolante térmico, sendo os vãos envidraçados considerados de uma única folha com caixilharia em alumínio.

As restantes soluções estudadas pressupõem um aumento igual de isolamento térmico para a cobertura e envolvente opaca para 8 espessuras diferentes (0,1,2,3,4,6,8,10 cm). Pressupõem ainda uma diminuição de coeficiente de transmissão térmica das soluções para os vãos envidraçados (4,9; 2,5 e 1,3 W/m²°C).

Serão então calculadas as Necessidades de aquecimento (N_{ic}) para os quatro casos de estudo em cada uma das três localizações diferentes, para soluções de diferentes espessuras de isolamento térmico e vãos envidraçados de diferentes desempenhos térmicos.

Será também averiguada a diferença de custo entre a situação de referência e as restantes, para as diferentes soluções construtivas e soluções de vãos envidraçados.

A construção posterior dos custos, tanto de energia para aquecimento como de soluções construtivas, será atingida após afectação dos custos a montante por variáveis de cariz económico.

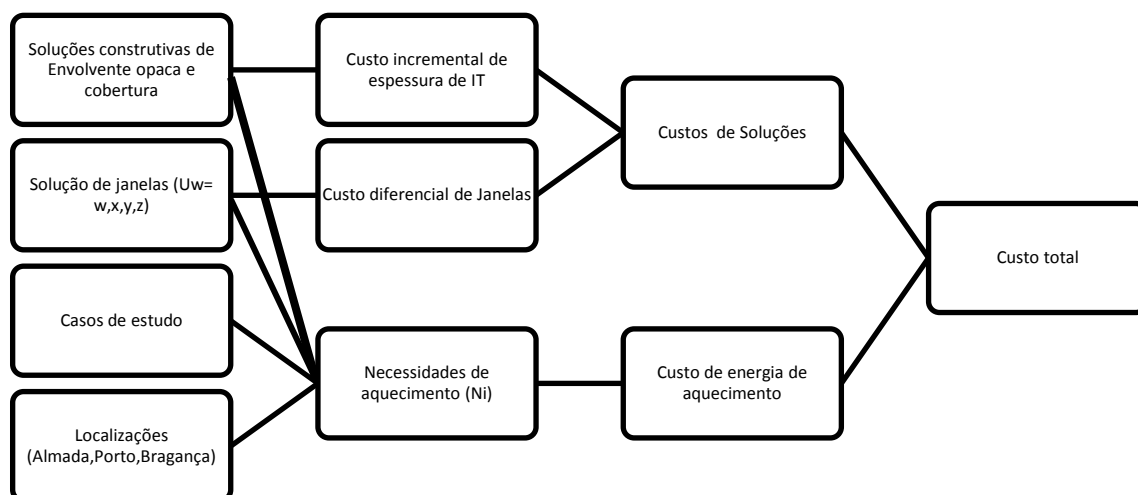


Figura 4.1 - Estrutura de custos

O método de ACCV utilizado é o método das anuidades, sendo o valor comparativo entre soluções o VAE resultante para cada uma delas. Como tal os valores de CCV serão apresentados em €/m².ano, sendo os custos das soluções trabalhados de forma a corresponderem a uma prestação anual do valor total, emulando a parcela de uma determinada prestação de crédito à habitação.

O período de estudo considerado será de 30 anos, tempo de vida de ETICS, de caixilhos vãos envidraçados e período médio de empréstimos de habitação.

O VAE é obtido através da soma entre duas parcelas, a parcela referente ao custo de soluções técnicas e a outra parcela referente ao custo da energia.

$$VAE = \text{Custo soluções técnicas} + \text{Custo de energia} \quad (\text{€/m}^2 \cdot \text{ano}) \quad 4.1$$

4.1.1 Custos de Soluções técnicas

Os custos das soluções, acima referidas, resultam dos custos das soluções construtivas e dos custos dos vãos envidraçados. Destes, será feita uma ponderação de modo a que correspondam ao custo unitário por m² de área útil. O resultado deste processo será o custo ponderado com o valor no presente. Para que este custo possa ser aliado ao custo da energia, é necessário afectá-lo de um factor que permita que o resultado final corresponda a uma “prestação” anual do pagamento desse custo de investimento (o custo global ponderado de vãos envidraçados e soluções construtivas).

Importa referir que estes custos são considerados constantes no decurso deste estudo, não variando assim com outros aspectos considerados, nomeadamente a localização.

O referido factor é o factor de anuidade (equação 4.2), como é implícito, refere-se a uma anuidade de um valor futuro. Assume-se que as variáveis a ele inerentes são estáticas para o período de cálculo em estudo.

$$a = \frac{(1+r)^n * r}{(1+r)^n - r} \quad 4.2$$

$$Custo\ de\ soluções = \frac{C_{IT} + C_{jan}}{A_{útil}} \times a \quad 4.3$$

4.1.1.1 Custo incremental de isolamento térmico

Na elaboração do custo incremental da espessura de isolamento térmico para as soluções construtivas de envolvente vertical opaca e cobertura, como anteriormente dito, é considerada a diferença de custo entre uma situação referência e a solução em estudo. Esta diferença implica um acréscimo de custos relacionados com especificidades de adaptação das soluções construtivas inerentes ao acréscimo isolamento térmico. Assim será expectável que com o aumento do isolamento térmico, aumente também a mão-de-obra na execução dos remates das soluções construtivas, aumentem os peitoris e ombreiras das janelas, etc, o que define os custos incrementais de isolamento térmico como não-lineares e difícil precisão. Neste estudo, contudo é assumido o pressuposto, de que o aumento de espessura de isolamento térmico, produz um aumento proporcionalmente linear de custo incremental.

$$C_{IT} = e_{IT} * c_{IT} * (A_{par} + A_{cob}) \quad 4.4$$

c_{IT} – custo de EPS de placa por metro quadrado e centímetro de espessura, 1,3196 €/m².cm.

e_{IT} – espessura de isolamento térmico em centímetros

C_{IT} – Custo incremental de espessura de isolamento térmico

A_{par} – área de envolvente opaca em contacto com o exterior

A_{cob} – área de cobertura plana

4.1.1.2 Custo de vãos envidraçados

Como retratado anteriormente, todos os quatro casos de estudo são compostos por diferentes tipos de vão envidraçado de variação em número. O custo de vãos envidraçados será não mais do que o somatório do número de janelas multiplicado pelo seu custo individual. Este é representado como o custo diferencial da solução referência, de $U_w=4,9W/m^2.^\circ C$, sendo que para simplificação de cálculo

não são considerados os custos associados ao aumento de complexidade tecnológica na montagem dos vãos envidraçados.

$$C_j = n_A * C_{j,A} + n_B * C_{j,B} + n_C * C_{j,C} \quad 4.5$$

n_i – número de janelas do tipo i

$C_{j,i}$ – custo de janelas do tipo i

C_j – custo total de vãos envidraçados

4.1.2 Custo de energia

O custo da energia é calculado de acordo com a equação 4.6, sendo função das soluções construtivas consideradas através do N_{ic} considerado, e função das variáveis económicas e conjunturais.

$$\text{Custo de energia} = 0,1 * N_{ic} * b * C_{ele} \quad 4.6$$

0,1 – valor de calculo do RCCTE, referente ao tempo de utilização de sistemas de aquecimento, posteriormente designado por factor de utilização

N_{ic} – Necessidades nominais de aquecimento de acordo com o RCCTE

b – factor de desconto

C_{ele} – custo da electricidade actualmente

Em que:

$$b = \frac{1 - (1 + r_e)^{-n}}{r_e} \quad 4.7$$

$$r_e = \frac{r - e}{1 + e} \quad 4.8$$

$$r = \frac{i - f}{1 + f} \quad 4.9$$

b – factor de desconto

r – taxa de juro real

r_e – taxa de juro real, descontando a taxa de escalada de preço da energia

i – taxa de juro

f – taxa de inflação

e – taxa de escalada de preço para a energia

4.1.2.1 Cálculo de Necessidades de aquecimento

O cálculo de N_{ic} para as diferentes soluções construtivas e diferentes casos de estudo, teve em conta a metodologia disposta no RCCTE. Por razões de uniformização de resultados finais foram considerados alguns pressupostos:

- Em relação ao tempo de utilização de sistemas de aquecimento foi considerado o valor previsto no RCCTE, 0,1.
- Para o cálculo das N_{ic} , foram considerados coeficientes de transmissão térmica de vãos envidraçados iguais para os diferentes tipos de janelas existentes, sendo feita uma ponderação entre o coeficiente transmissão térmica do caixilho U_f e coeficiente de transmissão térmica do vidro U_g , desta forma a janela do tipo B (2m por 1,5m) e a janela do tipo C (1m por 1,5m) terão o mesmo U_w embora proporções diferentes entre área de vidro e área de caixilho.
- À luz do disposto no RCCTE não é considerada a influência da transmitância dos diferentes tipos de vidros das janelas em estudo, como tal, os ganhos solares serão quantitativamente iguais aos da situação referência embora na realidade diminuam a par do aumento do U_g .

4.1.2.2 Variáveis económicas

Tratando-se de uma análise para um período de estudo de três décadas, o peso das variáveis económicas é consequentemente significativo, sendo os resultados, com evidência, condicionados pelas mesmas. Não é portanto de estranhar que a oscilação de uma taxa de juro em consideração produza, para 30 anos, uma oscilação significativa do preço e direcione para uma nova solução óptima. Ainda assim, a preponderância destas variáveis é proporcional à sua dificuldade de definição. Estas estão enraizadas em conjunturas e cenários macroeconómicos de grande complexidade, é-lhes inerente uma elevada imprevisibilidade.

Os modelos económicos associados a previsões de longo prazo, carecem de um tipo de análise de grande profundidade. De modo a não dispersar por esta complexidade, o estudo simplifica a definição das variáveis económicas, com ênfase na taxa de juro e inflação.

Importa referir que como pressuposto, as variáveis económicas serão estabelecidas como constantes para o período de cálculo.

Taxas de juro

Actualmente como resultado da crise económica existente, a taxa de juro estabelecida pelo Banco Central Europeu, encontra-se em valores considerados baixos, 0,3%, com previsões de 0,4% e 0,5% para o Verão de 2014 e Inverno de 2015 respectivamente [46]. Como critério na definição das taxas de juro considerou-se o valor destas em 2007 [29], precisamente antes da crise que se instalou e ainda persiste. O valor será então de 4%.

Inflação

A inflação, em concordância com a taxa de juro mantém-se em níveis baixos, perto da deflação [47]. No entanto está prevista uma subida para 1% em 2014 [48]. O critério mantém-se então como o definido para as taxas de juro. O valor, é o correspondente ao de 2007 e será de 3%.

Taxa de escalada de preço da energia

De forma a ter em conta a evolução prevista para o preço da electricidade, tendo esta como principal meio energético de aquecimento, foi associada ao cálculo de custo da energia a taxa de escalada de preço da energia.

Historicamente, os preços em Portugal ao consumidor subiram cerca de 54% entre 2004 e 2014, sendo esse facto representativo do seu potencial de aumento, tendo em conta o paradigma da dependência energética. [49].

No Roteiro Energético 2050 [50], são expostos alguns cenários para a evolução do preço da energia e efeito de medidas de descarbonização, dos quais resulta a ideia de que existirá um aumento entre 36% e 39% até 2050, sugerindo-se que os preços da electricidade crescerão de forma estável até 2030 e decaindo ligeiramente até 2050 [50].

Com base nestes cenários são avançados preços médios para a UE, com o valor do Euro em 2008, de 207,2€/MWh e 211,7€/MWh para os principais cenários. O primeiro, um cenário referência baseado nas projecções de crescimento de 1,7% ao ano para a UE, um segundo cenário baseado nas iniciativas políticas actuais nomeadamente as metas energéticas da UE para 2020 tendo em consideração crescimentos variáveis do PIB [49].

Na definição da taxa de escalada de preço da energia é tido em conta o parecer de Jorge Vasconcelos, ex-presidente da Entidade Reguladora de Serviços Energéticos, que em entrevista defende que o aumento acima referido será acompanhado por Portugal, embora abaixo da média europeia [51]. Assim o valor estabelecido neste trabalho é de 1% de aumento anual.

4.2 Análise de sensibilidade

A metodologia acima descrita, tem por fim obter os resultados de custos totais que melhor se compadeçam com as variáveis utilizadas (as características físicas de edifícios e as características climáticas da zona em que se inserem). Outras variáveis existentes, muito embora o seu peso, foram dadas para efeitos de cálculo como constantes. Estas são agora consideradas de forma a permitir uma melhor percepção do seu efeito nos resultados finais.

Como referido no Capítulo 2, a análise de sensibilidade permite entre outras coisas “estimar a dimensão de resultados resultantes do teste de vários cenários”. De acordo com isso, será verificada, por comparação com o cenário de referência (considerado o cenário disposto para aferição de custos/soluções óptimas), o desvio que as variáveis relacionadas com o custo da energia imputam ao resultado final.

4.2.1 Cenários 1,2 e 3

Para os cenários de tipologia numérica são tidas em conta as variáveis económicas e relacionadas com a evolução do preço da energia. As variáveis consideradas são a taxa de juro, a inflação e taxa de escalada de preço da energia, todas elas de carácter anual. Face ao grau de incerteza inerente às primeiras, os cenários considerados, reflectem duas situações, a actual e uma anterior à crise.

Assim, para efeitos da análise, considera-se o cenário de referência como sendo o utilizado numa primeira fase para os cálculos de VAE. Este cenário caracteriza-se pelo pressuposto de retoma da economia para níveis anteriores a 2008, ano inicial do período de crise. Os valores da taxa de escalada de preço da energia baseiam-se no cenário referência [50], seguindo um pressuposto de que a energia em Portugal por ser já demasiado cara e se estar ainda no início da liberalização do mercado, acompanhará de forma mais ténue essa evolução, daí ser 1% por oposição ao esperado para a média dos países membros da UE, que é de 1,7% anuais.

O cenário 1 caracteriza-se pelo pressuposto, de que as actuais condições das variáveis económicas, se manterão tal como se encontram à data, e a energia seguirá o aumento equiparado à média europeia, seguindo o cenário referência do Roteiro 2050 [50].

O cenário 2 caracteriza-se pelo mesmo cenário em termos económicos do cenário 1. Em termos energéticos, considera a evolução anual dos preços da electricidade ao consumidor registados no período considerado entre 2004 e 2014, 5,4% ao ano.

O cenário 3 caracteriza-se pelo mesmo cenário em termos económicos do cenário referência, enquanto que energeticamente a evolução de preços é igual à considerada para o cenário 2.

4.2.2 Cenários A e B

Para os cenários de tipologia alfabética são tidas em conta as variáveis correspondentes ao sistema de aquecimento em uso e factor de utilização.

Através destes diferentes cenários explora-se o impacto que o uso de outros equipamentos (com outras eficiências) e outros consequentes modos de ocupação e utilização dos sistemas de aquecimento provocam nos custos totais.

Importa referir que na aferição dos custos totais resultantes não é tida em conta a diferença de custos entre equipamentos (iniciais ou operacionais), sendo os resultados directamente consequentes das diferenças de eficiência e do tipo de consumo considerado.

Os sistemas de aquecimento considerados estão de acordo com RCCTE, sendo de potência de utilização inferior a 15kW.

No cenário referência, utilizado acima, refere-se a um sistema de aquecimento de radiadores convencionais eléctricos, com um rendimento considerado para efeitos de cálculo de RCCTE de 1. O factor de utilização refere a quantidade de energia gasta para aquecimento, face aquela que é necessária (N_{ic}).

No cenário A é considerado um sistema de bomba de calor de classe energética para aquecimento D com eficiência (COP) de 3. Para a fixação do factor de utilização, é feito o pressuposto de que na presença de um equipamento de maior eficiência, o utilizador deste equipamento terá uma maior disposição para fazer uso do mesmo, e desta forma o factor de utilização considerado é de 0,2.

No cenário B é considerado um sistema de bomba de calor de classe energética para aquecimento A com eficiência (COP) de 3,6. Na fixação do factor de utilização, mantém-se o pressuposto do cenário A, o valor será de 0,5, considerando-se no entanto, que não existe uma proporcionalidade directa entre o valor de eficiência do equipamento e o tempo de utilização do mesmo. O valor do factor de utilização pressupõe portanto uma maior disposição para a utilização do equipamento para aquecimento face à sua alta eficiência.

Quadro 4.1-Variáveis económicas e energética, eficiência de equipamento e factor de utilização

Cenários	Juros (%)	Inflação (%)	T.e.p.e (%)	Eficiência de equipamento (COP)	Factor de Utilização
Referência	4	3	1	1	0,1
1	1	0,5	1,7	1	0,1
2	1	0,5	5,4	1	0,1
3	4	3	5,4	1	0,1
A	4	3	1	3	0,2
B	4	3	1	3,6	0,5

4.3 Apresentação de resultados

Neste capítulo são dispostos os resultados e feita uma posterior análise dos mesmos.

Numa primeira parte é aplicada a metodologia de cálculo para os diferentes casos de estudo e localizações representativas das três distintas zonas de Inverno dispostas no RCCTE. Os resultados pretendem, como tal, evidenciar as diferenças que as zonas climáticas e características arquitectónicas dos casos de estudo, provocam no custo total, e de que forma os valores obtidos verificam o objectivo proposto no Capítulo 1.

Numa segunda parte, aplicando a metodologia de cálculo, é feita uma análise de sensibilidade, variando factores que foram tidos constantes na primeira parte. Avaliando-se dessa forma o efeito que esses factores produzem na definição de soluções óptimas, agora apenas considerando o caso I.

Neste capítulo são apresentados dois tipos de gráficos: o gráfico de espessura óptima de isolamento térmico e o gráfico de N_{ic} óptimas.

O primeiro, o gráfico de espessura óptima de isolamento térmico, procura, como o nome indica identificar a espessura óptima de isolamento térmico a aplicar nas soluções construtivas de envolvente opaca, levando a que o custo total seja o menor e portanto se esteja na presença de uma solução óptima. A sua construção é idêntica ao apresentado na Figura 2.3, em que a soma dos custos de soluções construtivas representada a vermelho na Figura 4.2, será somada aos custos relacionados com o gasto de energia para aquecimento a azul, resultando na curva apresentada a verde, correspondente aos custos totais.

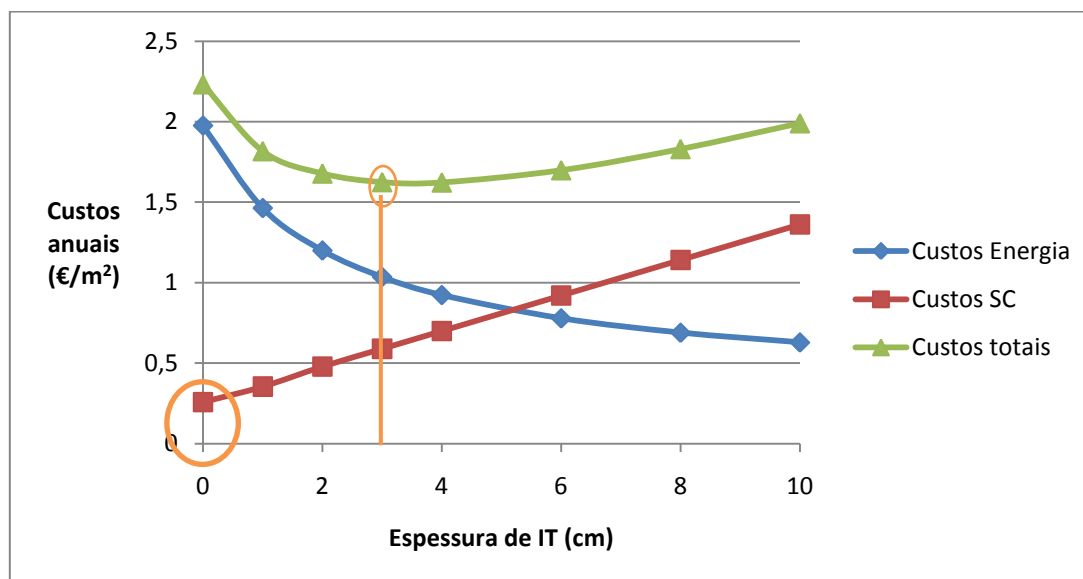


Figura 4.2-Construção gráfica de custos totais

Graficamente, os custos de soluções construtivas funcionam como uma recta, sendo o custo incremental do isolamento térmico o seu declive e o custo de vãos envidraçados a sua ordenada na origem. Desta forma, a mudança de vãos envidraçados em análise, corresponde a uma variação

posicional da recta no gráfico. Por outro lado, a curva correspondente aos Custos de energia será, face aos pressupostos fixados, função das variáveis relacionadas com características físicas dos casos de estudo e com a localização (graus-dias de aquecimento, meses de aquecimento e radiação solar). A morfologia da curva de custos totais é resultado destes dois efeitos, ocorrendo uma translação com a alteração da solução de vãos envidraçados em análise e variando a “abertura” da sua concavidade face a oscilação de custos de energia, vis-a-vis localização.

A exposição gráfica apresentada na Figura 4.3, proposta em [32], originalmente avalia o custo total das soluções pelo consumo de energia primária que estas implicam. Neste caso é avaliado o custo total das soluções pelo valor de N_{ic} referente.

Ao centro, na zona envolvente ao ponto de inflexão da curva (ponto de custo óptimo), encontram-se soluções em que custos de soluções construtivas e custos de energia equilibram a sua influência, existindo um comportamento binomial destes dois valores para a concretização de custos totais.

À esquerda da concavidade encontram-se situações em estado-de-arte, edifícios mais de acordo com o conceito de nZEB, soluções de custos totais mais elevados, mas com custos de energia bastante reduzidos, o que reflecte grande independência face a oscilações de custo de energia.

À direita da concavidade, encontram-se soluções referentes a edifícios tecnicamente deficitárias em termos de climatização passiva. O custo de energia desempenha um papel fulcral no custo total de soluções dentro deste campo de valores.

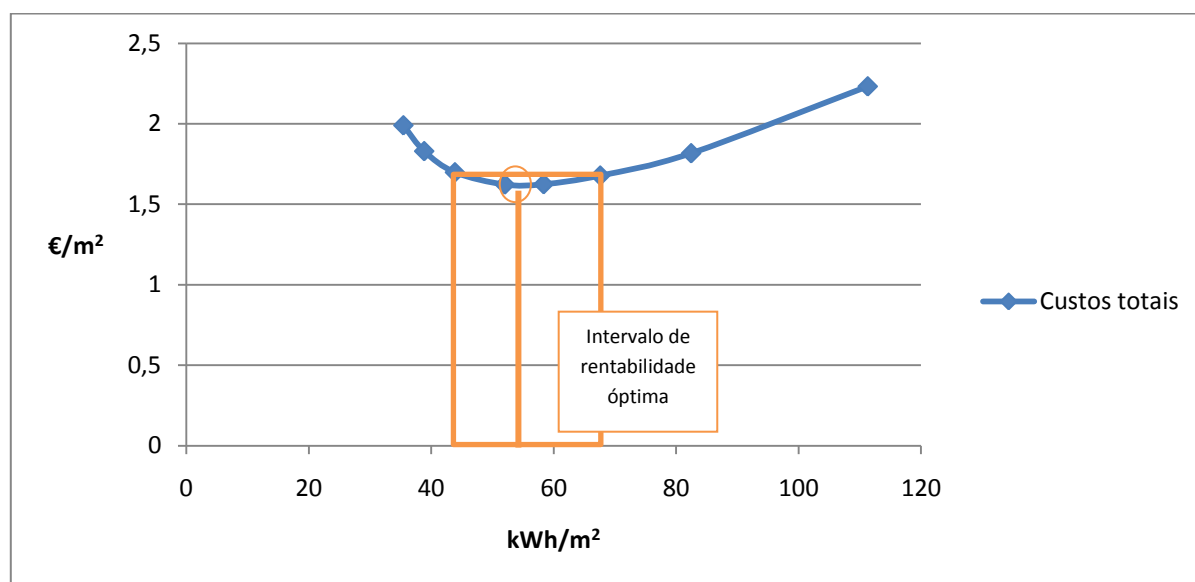


Figura 4.3-Esquema gráfico de custo-óptimo

(Todos os valores apresentados são de carácter anual).

4.4 Almada

4.4.1 Caso I

Para o Caso I em Almada as N_i (Necessidades Nominais de Aquecimento Máximas) têm um valor de $64,38\text{kWh/m}^2$ anuais. Na Figura 4.4 verifica-se que a espessura óptima de isolamento térmico aferida será de 4cm, o que corresponderá a custos totais de $1,68\text{€/m}^2$ (para solução de $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), $1,77\text{€/m}^2$ (para solução de $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e $1,79\text{€/m}^2$ (para solução de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$).

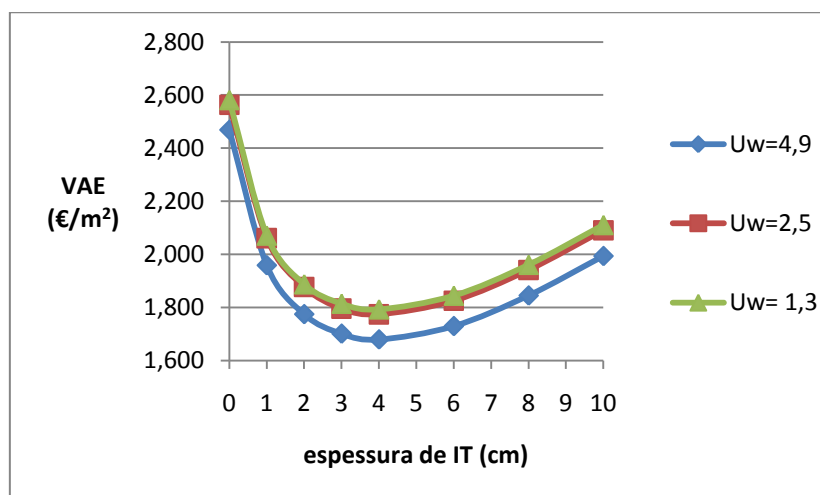


Figura 4.4-Solução óptima para caso I, em Almada

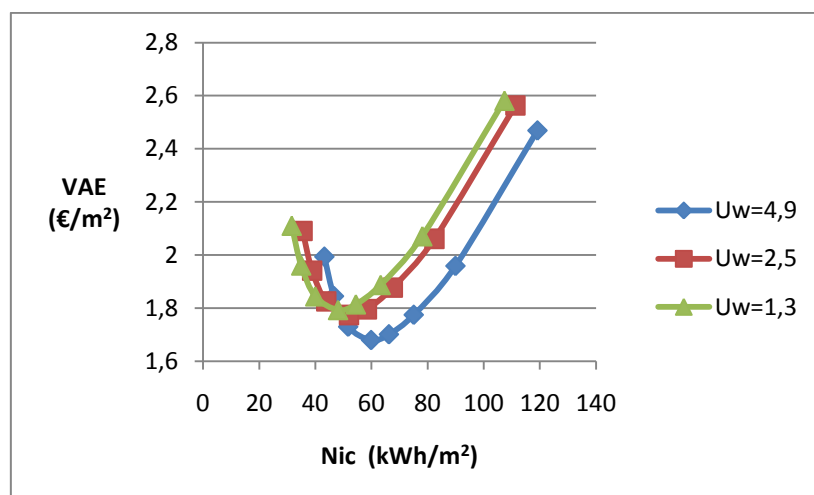


Figura 4.5-Gráfico de custo-óptimo para caso I, em Almada

Na Figura 4.5 é visível o impacto nas Nic, existindo uma diminuição natural das mesmas, face a diminuição de U_w dos vãos envidraçados. Esta diminuição coaduna-se com um aumento do custo óptimo. Assim as soluções óptimas apresentam respectivamente: $59,85\text{kWh/m}^2$ para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de $4,53\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar), $52,01\text{kWh/m}^2$

para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de $12,37\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar) e $48,1\text{kWh/m}^2$ para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de $16,28\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar).

Assim para o Caso I verifica-se que a solução óptima é caracterizada por 4cm de espessura isolamento térmico nas soluções de envoltivo opaca e de vão envidraçado de $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ de custo $1,68\text{€/m}^2$, com Nic de $59,85\text{kWh/m}^2$. Verifica-se ainda que as soluções mais próximas da solução óptima têm espessuras de 3cm e 6cm de isolamento térmico, com vãos envidraçados de $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Para estas o valor correspondente é de $1,70\text{€/m}^2$ e $1,73\text{€/m}^2$, respectivamente. Os valores de Nic, para estas soluções próximas do óptimo, dentro do intervalo óptimo de rentabilidade, são de $66,20\text{kWh/m}^2$ e $51,67\text{kWh/m}^2$.

4.4.2 Caso II

Para o Caso II em Almada as Ni têm um valor de $58,54\text{kWh/m}^2$ anuais.

Na Figura 4.6 verifica-se que o valor de espessura óptima de isolamento térmico é de 4cm. Os custos totais, consequentes serão de $1,44\text{€/m}^2$ para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $1,54\text{€/m}^2$ para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $1,56\text{€/m}^2$ para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

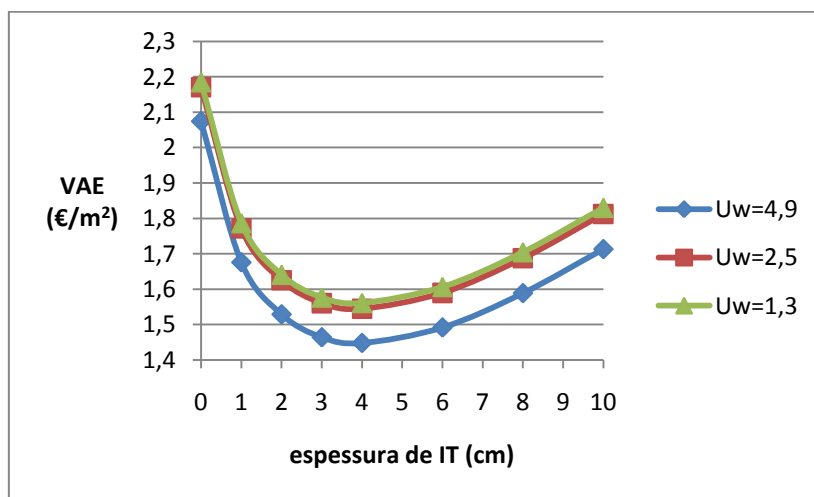


Figura 4.6- Solução óptima para caso II, em Almada

Através da Figura 4.7, é possível constatar, que as soluções óptimas (para cada um dos diferentes tipos de vãos envidraçados) têm um custo total maior para um menor valor de Nic. Sendo os valores de Nic de: $52,27\text{kWh/m}^2$ para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de $6,27\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar), $44,94\text{kWh/m}^2$ para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de

13,6kWh/m² para mínimo regulamentar) e 41,3kWh/m² para $U_w=1,3$ W/m².°C (perfazendo uma diferença de 17,24kWh/m² para mínimo regulamentar).

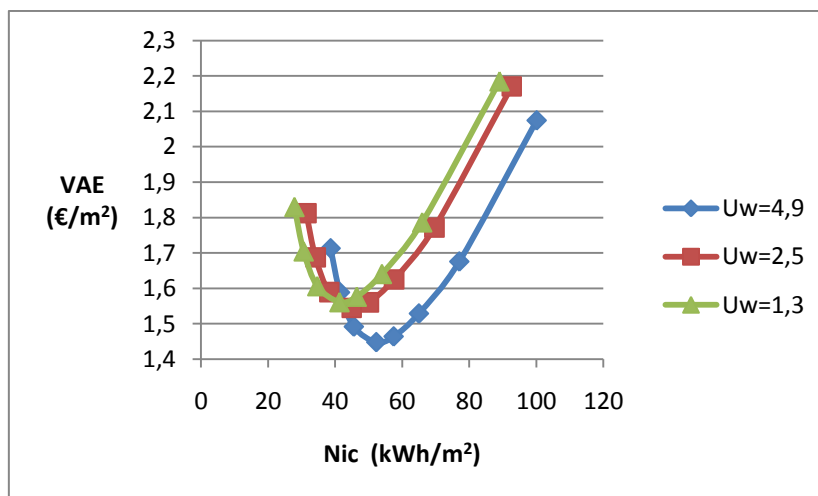


Figura 4.7-Gráfico de custo-óptimo para caso II, em Almada

Para o caso II, a espessura de isolamento térmico que dá resultado à solução óptima é de 4cm, sendo o custo total de 1,44€/m² referente ao vão envidraçado de $U_w=4,9$ W/m².°C. Esta solução corresponderá a Nic de 52,27kWh/m². Os valores mais próximos do óptimo têm VAE de 1,46€/m² (3cm de IT) e 1,49€/m² (6cm de IT), correspondendo a vãos envidraçados de $U_w=4,9$ W/m².°C. Para estes as Nic são de: 57,45kWh/m² (3cm de IT) e 45,58kWh/m² (6cm de IT).

4.4.3 Caso III

Para o Caso III em Almada as Ni têm um valor de 56,46kWh/m² anuais. Verifica-se, para este caso, através da Figura 4.8 que a espessura óptima de isolamento térmico de 4cm, com valores de custo total de 1,19€/m² para $U_w=4,9$ W/m².°C, 1,28€/m² para $U_w=2,5$ W/m².°C e 1,32€/m² para $U_w=1,3$ W/m².°C.

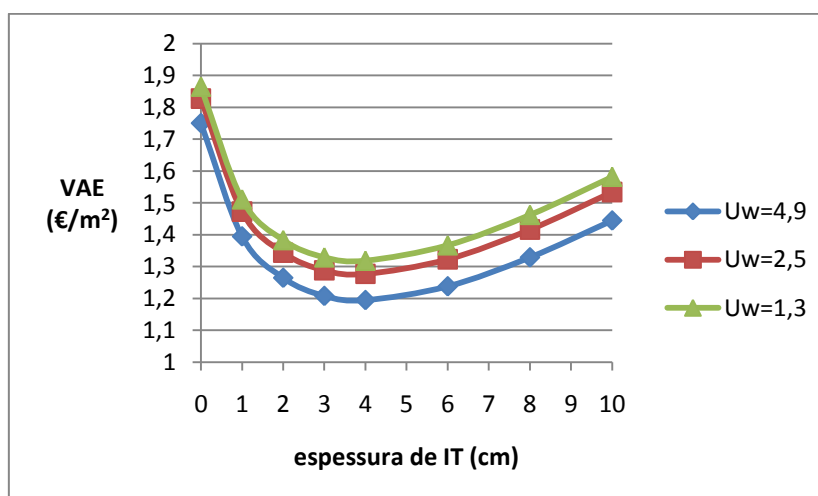


Figura 4.8- Solução óptima para caso III, em Almada

Na Figura 4.9 verificamos a mesma tendência dos casos anteriores, em que a solução de menor custo é a que tem maiores Nic. Em termos de valores verificamos que para a situação de $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ as Nic são de $41,53\text{kWh/m}^2$ (o que representa uma diferença de $14,93\text{kWh/m}^2$ para o mínimo regulamentar), para a situação de $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ as Nic são de $32,87\text{kWh/m}^2$ (o que representa uma diferença de $23,59\text{kWh/m}^2$ para o mínimo regulamentar) e para a situação de $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ as Nic são de $28,6\text{kWh/m}^2$ (o que representa uma diferença de $27,86\text{kWh/m}^2$ para o mínimo regulamentar).

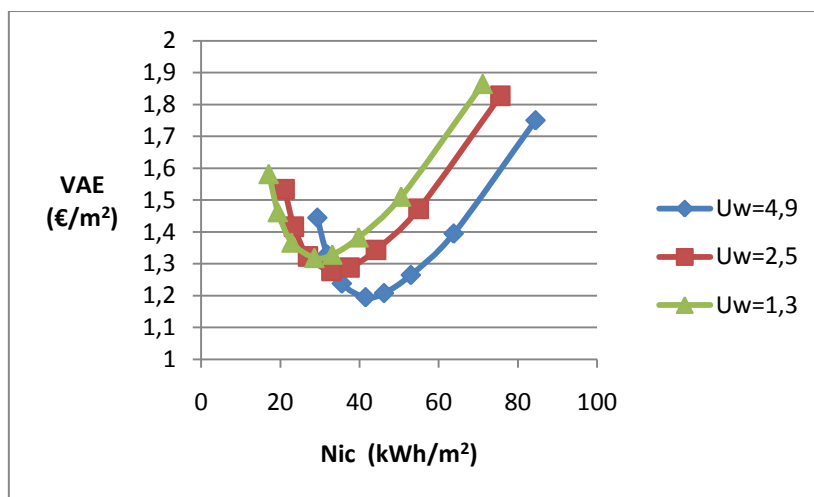


Figura 4.9-Gráfico de custo-óptimo para caso III, em Almada

Para o caso III a solução óptima tem um custo total de $1,19\text{€/m}^2$, para uma solução com 4cm de espessura de isolamento térmico e com um vão envidraçado com $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, correspondendo isto a Nic de $41,53\text{kWh/m}^2$. Os valores mais próximos do óptimo têm VAE de $1,21\text{€/m}^2$ (3cm de IT) e $1,24\text{€/m}^2$ (6cm de IT), correspondendo a vãos envidraçados de $U_w=4,9$. Para estes as Nic são de: $46,19\text{kWh/m}^2$ (3cm de IT) e $35,54\text{kWh/m}^2$ (6cm de IT).

4.4.4 Caso IV

Para o Caso IV em Almada as Ni têm um valor de $50,74\text{kWh/m}^2$ anuais.

Neste caso a espessura óptima, à semelhança dos outros casos mantém-se em 4cm, correspondendo a um custo total para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ de $0,97\text{€/m}^2$, sendo o custo total para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ de $1,06\text{€/m}^2$ e o custo total para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ de $1,10\text{€/m}^2$.

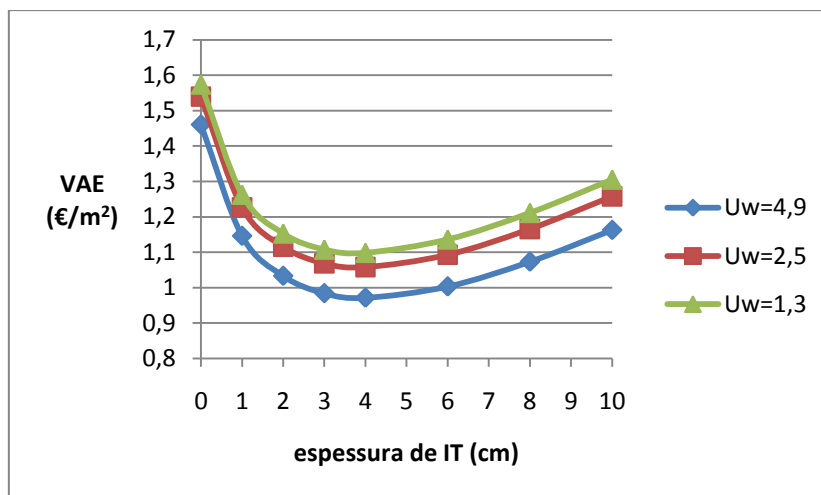


Figura 4.10- Solução óptima para caso IV, em Almada

Quanto aos valores de Nic, o custo total óptimo relativo continua a ser menor quanto maior as Nic. Sendo os valores Nic são de: 34,35kWh/m² para Uw=4,9 W/m².°C (representa uma diferença de 16,39kWh/m² para o mínimo regulamentar), 26,31kWh/m² para Uw=2,5 W/m².°C (representa uma diferença de 24,43kWh/m² para o mínimo regulamentar) e 22,39kWh/m² para Uw=1,3 W/m².°C (representa uma diferença de 28,35kWh/m² para o mínimo regulamentar).

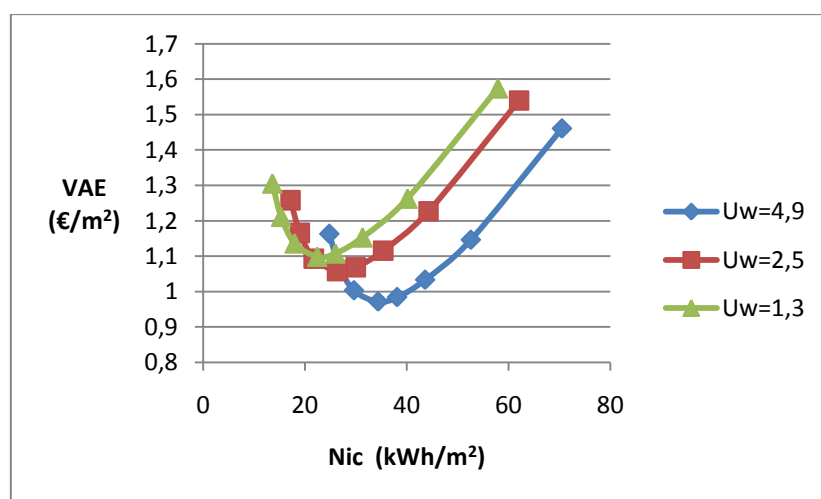


Figura 4.11-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, em Almada

Para o caso IV a solução óptima tem um custo total de 0,97€/m², correspondendo a um conjunto de soluções de envoltante opaca com 4cm de isolamento térmico e com um vão envidraçado de Uw=1,3 W/m².°C. A solução óptima terá um valor de Nic de 34,35kWh/m². Os valores mais próximos do óptimo têm VAE de 0,98€/m² (3cm de IT) e 1,00€/m² (6cm de IT), correspondendo a vãos envidraçados de Uw=4,9 W/m².°C. Para estes as Nic são de: 38,09kWh/m² (3cm de IT) e 29,610kWh/m² (6cm de IT).

4.4.5 Resumo

Face a análise gráfica e aos dados apresentados no Quadro 4.2, é possível verificar que quanto menores forem os valores de Ni, menor será a exigência térmica, menores serão os gastos em energia e portanto menor será a sua influência nos custos totais. Graficamente, isto é visível na concavidade dos gráficos que relacionam o custo total com a espessura de isolamento térmico. Nestes verifica-se uma concavidade mais definida, uma vez que os custos das soluções construtivas são mais influentes e, por conseguinte, uma assíntota oblíqua que deriva desses custos é mais evidente. A nível de valores, a menor influência do custo da energia nos custos totais, acaba por tornar mais evidente as diferenças entre custos de soluções construtivas das diferentes soluções e, portanto, com o decréscimo das Nic, dá-se uma maior diferença entre custos totais óptimos para os diferentes vãos envidraçados.

Quadro 4.2-Resumo de resultados para Almada

		Espessura de IT (cm)	Ni (kWh/m ²)	Nic (kWh/m ²)	Δ Ni-Nic (%)	Δ Nic(ref)- Nic (%)	Custo total ótimo (€/m ²)	Δ Custo total (%)
Caso I	Uw=4,9	3	64,38	66,2	2,827	10,610	1,702	1,319
	Uw=4,9	6		51,67	-19,742	-13,668	1,73	2,986
	Uw=4,9			59,85	-7,036	0,000	1,680	0,000
	Uw=2,5	4		52,01	-19,214	-13,099	1,774	5,626
	Uw=1,3			48,1	-25,287	-19,632	1,793	6,754
Caso II	Uw=4,9	3	58,54	57,45	-1,862	9,910	1,464	1,102
	Uw=4,9	6		45,58	-22,139	-12,799	1,492	3,036
	Uw=4,9			52,27	-10,711	0,000	1,448	0,000
	Uw=2,5	4		44,94	-23,232	-14,023	1,545	6,678
	Uw=1,3			41,3	-29,450	-20,987	1,561	7,798
Caso III	Uw=4,9	3	56,46	46,19	-18,190	11,221	1,208	1,078
	Uw=4,9	6		35,54	-37,053	-14,423	1,238	3,588
	Uw=4,9			41,53	-26,443	0,000	1,195	0,000
	Uw=2,5	4		32,87	-41,782	-20,852	1,277	6,865
	Uw=1,3			28,6	-49,345	-31,134	1,318	10,307
Caso IV	Uw=4,9	3	50,74	38,09	-24,931	10,888	0,984	1,275
	Uw=4,9	6		29,61	-41,644	-13,799	1,003	3,231
	Uw=4,9			34,35	-32,302	0,000	0,972	0,000
	Uw=2,5	4		26,31	-48,147	-23,406	1,058	8,906
	Uw=1,3			22,39	-55,873	-34,818	1,098	13,029

É ainda de assinalar a maior proximidade de valores para as situações de $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, ainda que para esta localização, e face as variáveis consideradas na construção dos custos, a solução construtiva ótima é composta por soluções para a envolvente opaca com 4cm de isolamento térmico e janelas com U_w de $4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Salienta-se que, das soluções ótimas obtidas, todas correspondem a valores de N_{ic} inferiores às N_i . No entanto enquanto que os casos I e II ficam a distâncias inferiores a 15%, desvio mínimo previsto pela EPBD recast, os casos III e IV registam valores bastante superiores a esses 15%, respectivamente 26,4% e 32,3%.

As soluções com custos mais próximos do custo ótimo apresentam diferenças pouco significativas em termos de custos mas relativamente consideráveis em termos de N_{ic} . Com diferenças na casa dos 10%, para as N_{ic} , em relação a solução de custo-ótimo, embora uma das soluções não respeite o mínimo regulamentar (solução com 3cm de isolamento térmico e vãos envidraçados com $U_w=4,9$ para o caso I).

4.5 Porto

4.5.1 Caso I

Para o Caso I, no Porto as N_i têm um valor de $87,61 \text{ kWh/m}^2$ anuais.

Na Figura 4.12 verifica-se que o valor de espessura ótima de isolamento térmico é de 6cm. Os custos totais, consequentes são de $2,25 \text{ €/m}^2$ para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $2,28 \text{ €/m}^2$ para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $2,27 \text{ €/m}^2$ para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

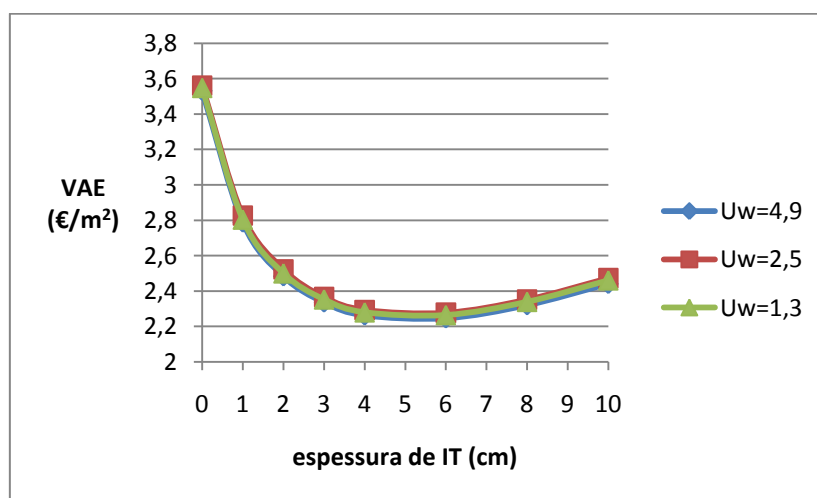


Figura 4.12- Solução ótima para caso I, para o Porto

Na Figura 4.13 há grande proximidade de valores de custo total, sendo marginal a diferença nesses valores face à diferença observada entre as várias Nic. Neste caso as Nic tomam os valores de: 76,58 kWh/m² para o $U_w=4,9$ W/m².°C (uma diferença de 11,03 kWh/m² face ao mínimo regulamentar), 65,69 kWh/m² para $U_w=2,5$ W/m².°C (uma diferença de 21,92 kWh/m² face ao mínimo regulamentar) e 60,26 kWh/m² para $U_w=1,3$ W/m².°C (para uma diferença de 27,35 kWh/m² face ao mínimo regulamentar).

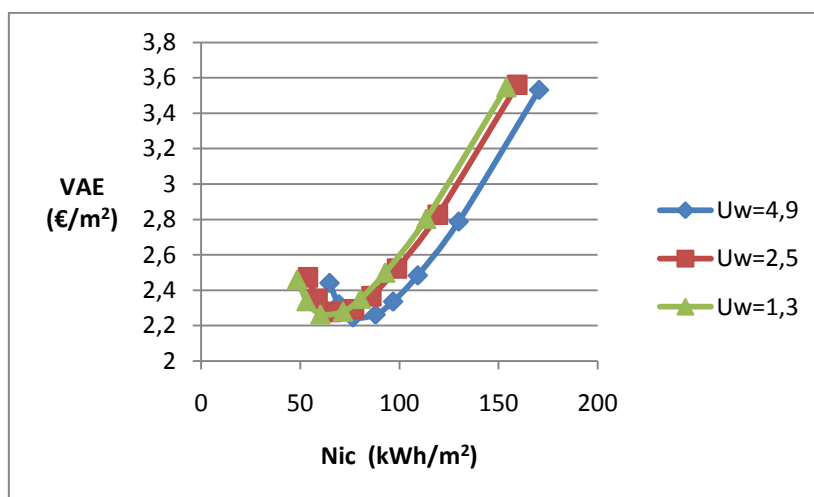


Figura 4.13-Gráfico de custo-óptimo para caso I, para o Porto

Perante a observação da Figura 4.12 e da Figura 4.13, as diferenças entre custos totais para os diferentes vãos envidraçados são bastante pequena face às diferentes Nic das soluções ótimas, sendo ainda de referir o facto da solução $U_w=1,3$ W/m².°C, inicialmente mais cara das três, ser mais económica do que a solução $U_w=2,5$ W/m².°C.

A solução óptima será então composta por 6cm de isolamento térmico nas soluções de envolvente opaca e vãos envidraçados com $U_w=4,9$ W/m².°C, com um custo total de 2,25€/m², com Nic correspondente de 76,58 kWh/m². As soluções mais próximas do custo óptimo são: a solução de 4cm de IT com vão envidraçado de $U_w=4,9$ W/m².°C com VAE de 2,26€/m² e Nic de 87,97 kWh/m²; a solução de 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=1,3$ W/m².°C com VAE de 2,26€/m² e Nic de 60,26 kWh/m²; a solução com 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=2,5$ W/m².°C com VAE de 2,28€/m² e Nic de 65,69 kWh/m².

4.5.2 Caso II

Para o Caso II no Porto as Ni têm um valor de 79,50 kWh/m² anuais.

Para este caso a espessura óptima de isolamento térmico é de 6cm, sendo os custos totais de 1,96€/m² para $U_w=4,9$ W/m².°C, 2,00€/m² para $U_w=2,5$ W/m².°C e 1,98€/m² para $U_w=1,3$ W/m².°C.

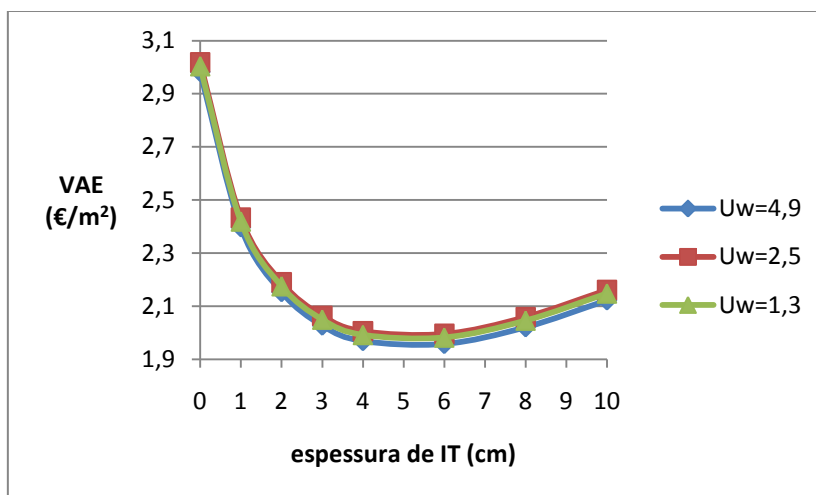


Figura 4.14- Solução óptima para caso II, para o Porto

Os valores de Nic referentes a este caso são expressos na Figura 4.15, sendo de 68,09 kWh/m² para $U_w=4,9$ W/m².°C, 57,91 kWh/m² para $U_w=2,5$ W/m².°C e 52,84 kWh/m² para $U_w=1,3$ W/m².°C, com diferenças para o mínimo regulamentar respectivamente de 11,41 kWh/m², 21,59 kWh/m² e 26,66 kWh/m².

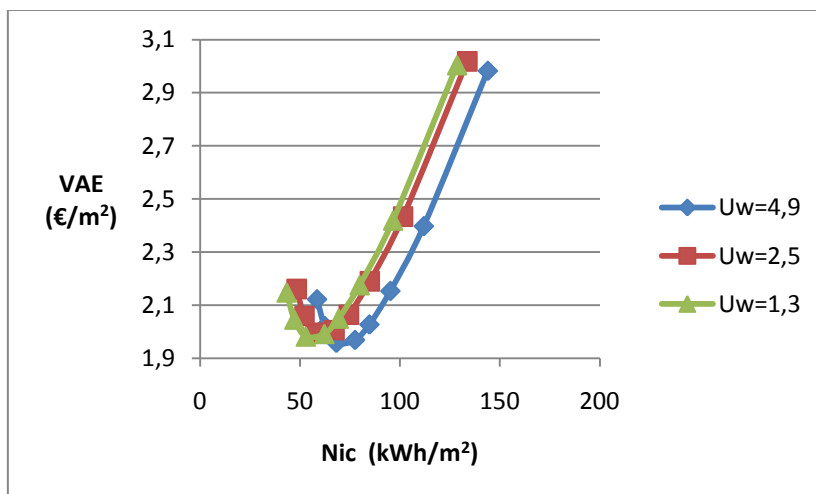


Figura 4.15-Gráfico de custo-óptimo para caso II, para o Porto

Mantém-se para este caso, o referido no anterior em que a solução de $U_w=1,3$ W/m².°C se apresenta como solução mais favorável em termos económicos, que a solução de $U_w=2,5$ W/m².°C. A solução óptima terá 6cm de isolamento térmico nas soluções construtivas de envoltivo opaca e com vãos envidraçados de $U_w=4,9$ W/m².°C, terá um custo total de 1,96€/m² e Nic correspondente de 68,09 kWh/m².

As soluções mais próximas do custo óptimo são: a solução de 4cm de IT com vão envidraçado de $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,97\text{€/m}^2$ e Nic de $77,42\text{kWh/m}^2$; a solução de 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,98\text{€/m}^2$ e Nic de $52,84\text{kWh/m}^2$; a solução com 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,99\text{€/m}^2$ e Nic de $57,910\text{kWh/m}^2$.

4.5.3 Caso III

Para o Caso III no Porto as Ni têm um valor de $76,62\text{kWh/m}^2$ anuais. Embora ténue a diferença de entre custos totais para soluções com 6cm e de 4cm (0,46% para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, 0,33% para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e 0,23% para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) a espessura óptima de isolamento térmico é de 6cm. Os custos totais são de $1,64\text{€/m}^2$ para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $1,65\text{€/m}^2$ para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $1,66\text{€/m}^2$ para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

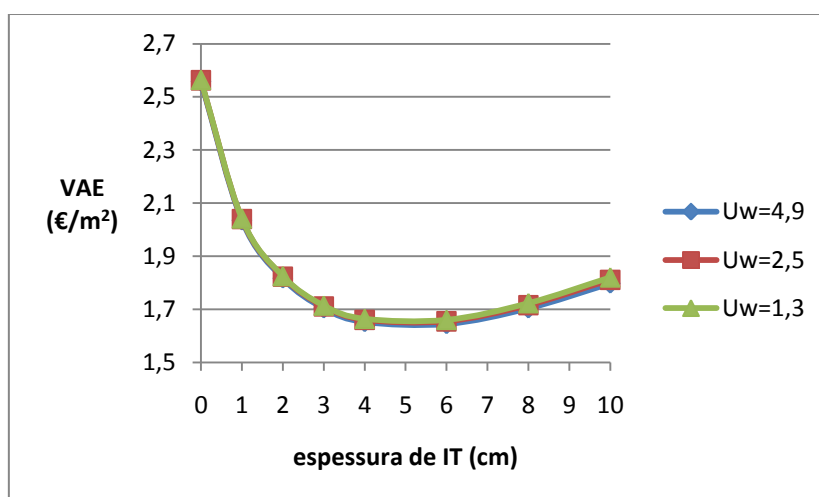


Figura 4.16-- Solução óptima para caso III, para o Porto

Face uma grande semelhança de valores de custo total, as diferenças tomam ainda maior relevância, como demonstrado na Figura 4.17. As Nic para este caso são de: $55,14\text{kWh/m}^2$ para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $21,48 \text{ kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar), $43,02 \text{ kWh/m}^2$ para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $33,6 \text{ kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar) e $37,04 \text{ kWh/m}^2$ para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $39,58 \text{ kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar).

Embora que ténue, face ao caso anterior, é possível verificar uma alternância de “posições” entre custos totais de $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

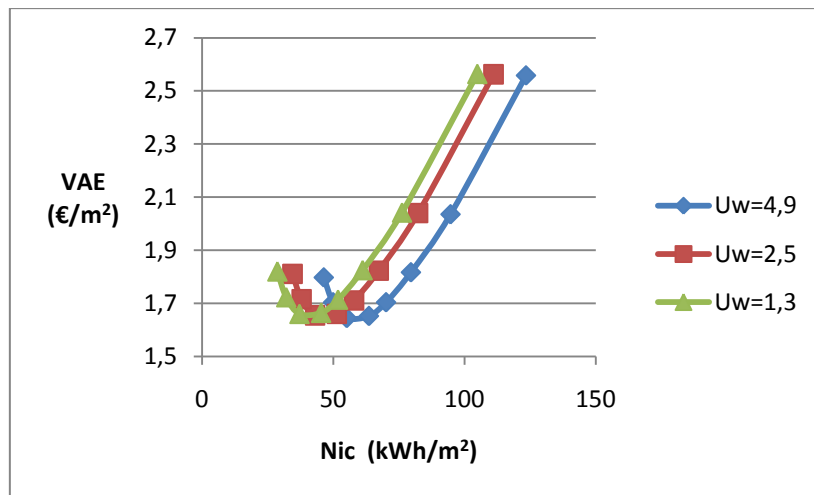


Figura 4.17-Gráfico de custo-óptimo para caso III, para o Porto

A solução óptima tem um custo total de 1,64€/m², 6cm de IT e $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, tendo uma Nic correspondente de 55,14 kWh/m².

As soluções mais próximas do custo óptimo são: a solução de 4cm de IT com vão envidraçado de $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de 1,65€/m² e Nic de 63,58kWh/m²; a solução de 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de 1,65€/m² e Nic de 43,02kWh/m²; a solução com 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de 1,66€/m² e Nic de 37,04kWh/m².

4.5.4 Caso IV

Para o Caso IV, o Porto tem Ni de valor igual a 68,67kWh/m² anuais.

Neste caso à semelhança do anterior os valores que distinguem a espessura óptima de isolamento térmico entre 4cm e 6cm têm diferenças bastante pequenas, como é visível na Figura 4.18. Os valores de custos totais são de: 1,36€/m² para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (1,37€/m² para uma espessura de 4cm), 1,37€/m² para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (1,38€/m² para uma espessura de 4cm) e 1,38€/m² para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (1,39€/m² para uma espessura de 4cm).

Mais uma vez, ao serem muito próximos os valores de custos totais, é importante observar as Nic. Para este caso, como exposto na Figura 4.19, 46,63kWh/m² para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com diferença de 22,04kWh/m²), 35,32kWh/m² para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com diferença de 33,35kWh/m²) e 29,79kWh/m² para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com diferença de 38,88kWh/m²).

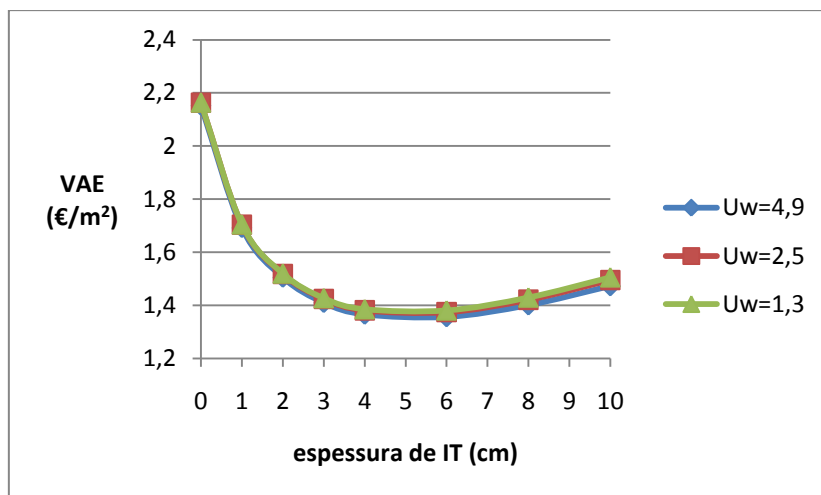


Figura 4.18- Solução óptima para caso IV, para o Porto

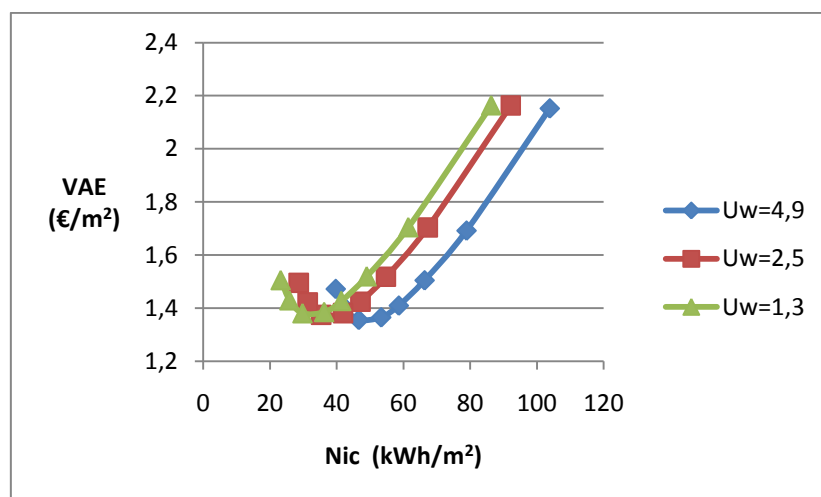


Figura 4.19-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, para o Porto

A solução óptima tem um custo total de $1,35\text{€/m}^2$, com espessura de isolamento térmico nas soluções de envoltivo opaca de 6cm e vãos envidraçados com $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Esta solução terá um valor de Nic correspondente a $46,63\text{kWh/m}^2$.

As soluções mais próximas do custo óptimo são: a solução de 4cm de IT com vão envidraçado de $U_w=4,9\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,37\text{€/m}^2$ e Nic de $53,36\text{kWh/m}^2$; a solução de 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=2,5\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,38\text{€/m}^2$ e Nic de $35,32\text{kWh/m}^2$; a solução com 6cm de IT com vão envidraçado de $U_w=1,3\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ com VAE de $1,38\text{€/m}^2$ e Nic de $29,79\text{kWh/m}^2$.

4.5.5 Resumo

Para esta localização, e por conseguinte para estes valores de Ni e Nic, o custo da energia tem uma influência que induz a algum equilíbrio entre custo de soluções construtivas e custo de energia na

construção de um custo total. Esta observação é facilmente verificada pela concavidade mais larga nos gráficos de €/m²-cm, por uma menos evidente (para as espessuras analisadas) assíntota oblíqua, originária da influência do custo de soluções construtivas. Em termos de valores isso fica reflectido nas diferenças residuais nos custos totais entre as soluções de 4cm e 6cm de espessura de isolamento térmico.

Importa ainda verificar que os casos I e II, em particular (pelo facto de nestes ser mais vantajoso uma solução mais cara inicialmente mas mais eficiente termicamente ($U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) do que outra mais barata e de comportamento térmico razoável ($U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)) e todos os casos em geral (pelas diferenças bastante diminutas entre VAE), evidenciam que para as variáveis fixas (financeiras, morfológicas dos edifícios, sistemas de aquecimento e factor de utilização) esta localização tem um carácter transitivo. Demarcando um campo de resultados em que as soluções construtivas mais baratas inicialmente tinham um peso maior, num custo total menor, do que as mais caras inicialmente, para um campo de resultados em que se verifica o contrário.

Quadro 4.3-Resumo de resultados para Porto

		Espessura de IT (cm)	Ni (kWh/m2)	Nic (kWh/m2)	Δ Ni-Nic (%)	Δ Nic(ref)- Nic (%)	Custo total optimo (€/m2)	Δ Custo total (%)
Caso I	Uw=4,9	4	87,61	87,97	0,411	14,873	2,263	0,742
	Uw=1,3			71,61	-18,263	-6,490	2,28	1,499
	Uw=4,9	6		76,58	-12,590	0,000	2,246	0,000
	Uw=2,5			65,69	-25,020	-14,220	2,278	1,393
	Uw=1,3			60,26	-31,218	-21,311	2,265	0,835
Caso II	Uw=4,9	4	79,5	77,42	-2,616	13,702	1,969	0,546
	Uw=1,3			62,11	-21,874	-8,782	1,992	1,721
	Uw=4,9	6		68,09	-14,352	0,000	1,958	0,000
	Uw=2,5			57,91	-27,157	-14,951	1,996	1,922
	Uw=1,3			52,84	-33,535	-22,397	1,983	1,237
Caso III	Uw=4,9	4	76,62	63,58	-17,019	15,306	1,652	0,461
	Uw=1,3			45,3	-40,877	-17,845	1,664	1,191
	Uw=4,9	6		55,14	-28,034	0,000	1,644	0,000
	Uw=2,5			43,02	-43,853	-21,980	1,655	0,629
	Uw=1,3			37,04	-51,658	-32,826	1,660	0,976
Caso IV	Uw=4,9	4	68,67	53,36	-22,295	14,433	1,366	0,739
	Uw=1,3			36,28	-47,168	-22,196	1,386	2,214
	Uw=4,9	6		46,63	-32,096	0,000	1,356	0,000
	Uw=2,5			35,32	-48,566	-24,255	1,375	1,384
	Uw=1,3			29,79	-56,619	-36,114	1,381	1,878

Embora marginal, e como exposto no Quadro 4.3, a solução óptima é composta por 6cm de espessura de isolamento térmico para as soluções de envolvente opaca e vãos envidraçados de $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

À semelhança do ocorrido para Almada, os casos I e II mantêm-se dentro dos 15% estipulados como limite na EPBD, ainda que neste caso mais perto do limite. Os casos III e IV ultrapassam o limite de 15% com diferenças de 28% e 32,1% respectivamente.

4.6 Bragança

4.6.1 Caso I

Para o Caso I, Bragança tem N_i um valor de $151,62\text{kWh/m}^2$ anuais. Embora seja de difícil verificação na Figura 4.20, a espessura óptima de IT é de 8cm. Os valores custo total para os diferentes tipos de vãos envidraçados são: $3,80\text{€/m}^2$ para $U_w=4,9\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $3,66\text{€/m}^2$ para $U_w=2,5\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $3,55\text{€/m}^2$ para $U_w=1,3\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. As diferenças entre custos totais para as soluções com 6cm e 10cm são da ordem de $0,04\text{€/m}^2$.

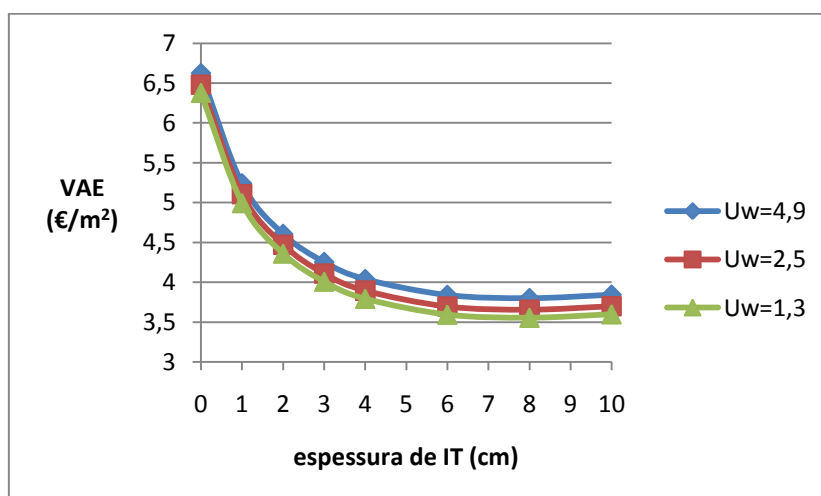


Figura 4.20- Solução óptima para caso I, em Bragança

Pela observação da Figura 4.21 verificamos que a solução de menor custo total corresponde à de menor N_{ic} , sendo as N_{ic} de: $140,92\text{kWh/m}^2$ para $U_w=4,9\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença de $10,7\text{ kWh/m}^2$ para N_i), $121,56$ para $U_w=2,5\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença de $30,06\text{ kWh/m}^2$ para N_i) e $111,89\text{ kWh/m}^2$ para $U_w=1,3\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença para N_i de $39,73\text{ kWh/m}^2$).

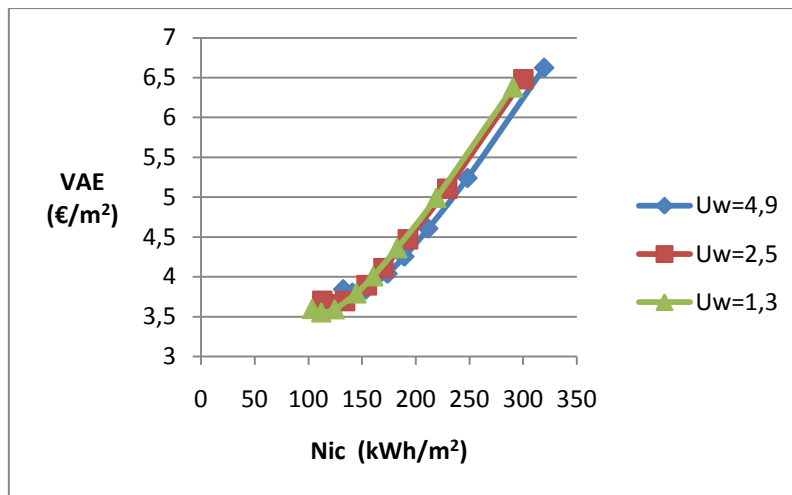


Figura 4.21-Gráfico de custo-óptimo para caso I, em Bragança

A solução óptima para este caso terá um custo total de 3,55€/m², correspondendo a uma solução com vãos envidraçados de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e espessura de isolamento térmico na envolvente opaca de 8cm. Esta solução terá as menores Nic das soluções analisadas para este caso, tomando o valor de 111,89kWh/m².

As soluções mais próximas do óptimo em termos de custo são soluções, ao contrário do que acontece para Porto, com o mesmo vão envidraçado variando apenas a sua espessura de isolamento térmico para a envolvente. Estas são: a solução com 6cm de IT com um VAE de 3,59€/m² e Nic de 124,39kWh/m²; a solução com 10cm de IT com um VAE de 3,60€/m² e Nic de 103,37kWh/m².

4.6.2 Caso II

Para o Caso II, Bragança tem para Ni um valor de 137,27kWh/m² anuais.

À semelhança do caso I, através da análise da Figura 4.22, é difícil de distinguir com clareza a melhor solução. A espessura óptima de isolamento térmico será de 8cm, sendo a diferença do custo total para as espessuras de 6cm e 10cm na ordem de 0,04€/m². Os custos totais são 3,383€/m² para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, 3,26€/m² para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e 3,16€/m² para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Na Figura 4.23 é possível novamente observar que a solução de menor custo total é a que corresponde a menores Nic para os três diferentes tipos de vãos envidraçados em estudo. As Nic são de: 128,08kWh/m² para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença de 9,19 kWh/m² para Ni), 109,94 para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença de 27,33 kWh/m² para Ni) e 100,88 kWh/m² para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (com uma diferença para Ni de 36,39 kWh/m²).

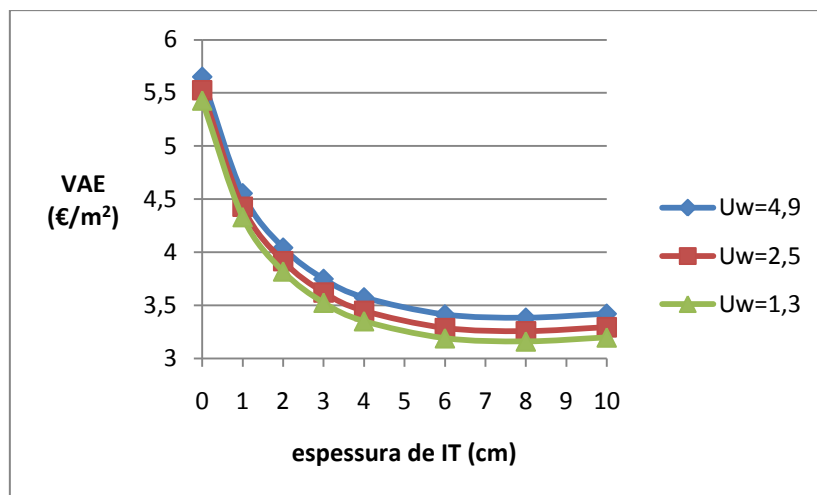


Figura 4.22- Solução óptima para caso II, em Bragança

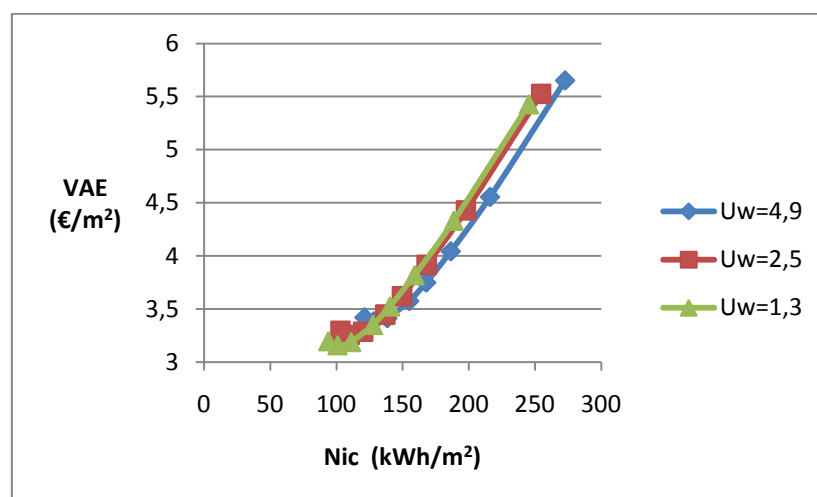


Figura 4.23-Gráfico de custo-óptimo para caso II, em Bragança

Para este caso, a solução óptima tem um custo total de $3,16\text{€/m}^2$, para uma espessura de isolamento térmico de 8cm e vãos envidraçados com $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, esta solução tem um valor de Nic de $100,88\text{kWh/m}^2$.

As soluções com um custo mais próximo do óptimo para o caso II, continuam a ter um vão envidraçado de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ variando a espessura de isolamento térmico. São assim: a solução com 6cm de IT com VAE de $3,19\text{€/m}^2$ e Nic de $111,14\text{kWh/m}^2$; a solução com 10cm de IT com VAE de $3,20\text{€/m}^2$ e Nic de $93,89\text{kWh/m}^2$.

4.6.3 Caso III

Para o Caso III, Bragança tem para Ni um valor de $132,16\text{kWh/m}^2$ anuais.

A espessura óptima de isolamento térmico é de 8cm, sendo os custos totais de 2,92€/m² para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, 2,73€/m² para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e 2,63€/m² para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Pela análise da Figura 4.24 verifica-se que a diferença de custo total para soluções de 6cm é marginal com valores que rondam os 0,03€/m².

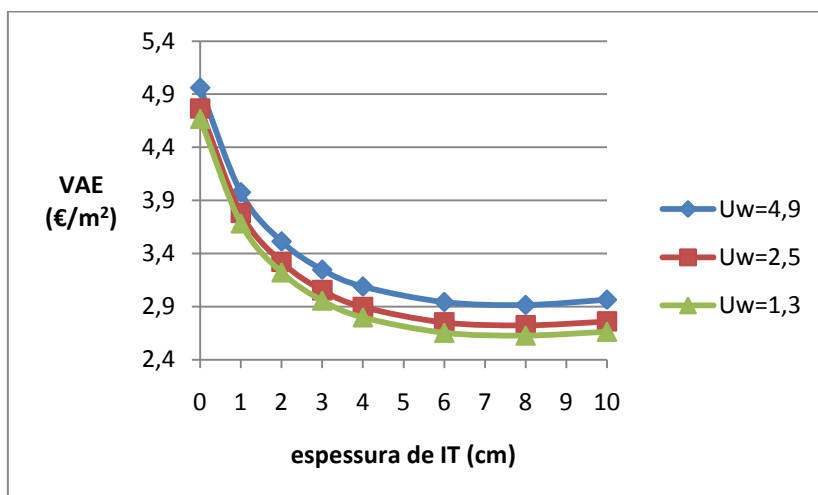


Figura 4.24- Solução óptima para caso III, em Bragança

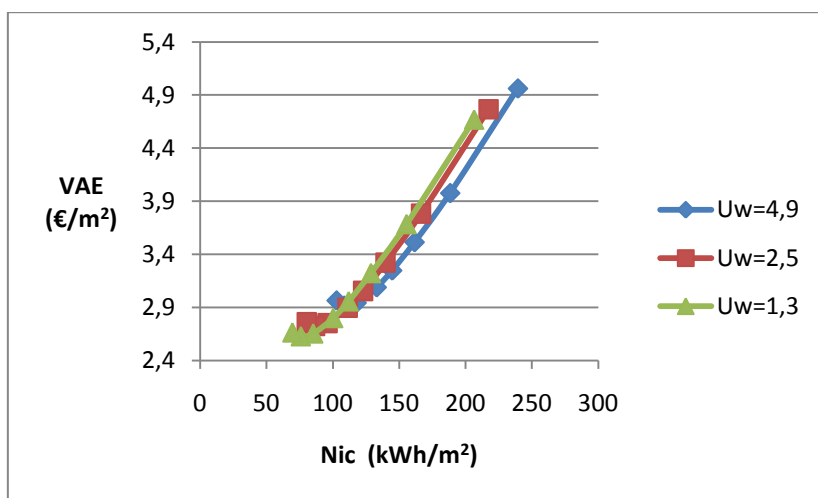


Figura 4.25-Gráfico de custo-óptimo para caso III, em Bragança

Os valores de Nic são: 108,49kWh/m² para $U_w=4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de 23,67kWh/m² para mínimo regulamentar), 86,63kWh/m² para $U_w=2,5 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de 45,53kWh/m² para mínimo regulamentar) e 75,74kWh/m² para $U_w=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (perfazendo uma diferença de 56,42kWh/m² para mínimo regulamentar).

O melhor custo total, referente portanto à solução óptima, é de 2,63€/m², a espessura de isolamento térmico é de 8cm e os vãos envidraçados de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, esta solução tem um valor de Nic de 75,74kWh/m².

As soluções com um custo mais próximo do óptimo para o caso III, continuam a ter um vão envidraçado de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ variando a espessura de isolamento térmico. São assim: a solução com 6cm de IT com VAE de $2,66\text{€/m}^2$ e Nic de $85,08\text{kWh/m}^2$; a solução com 10cm de IT com VAE de $2,67\text{€/m}^2$ e Nic de $69,39\text{kWh/m}^2$.

4.6.4 Caso IV

Para o Caso IV em Bragança tem para Ni um valor de $118,1\text{kWh/m}^2$ anuais.

Mais perceptível que em figuras anteriores, através da observação da Figura 4.26 é possível constatar que a espessura óptima de IT é de 8cm, com custos totais de $2,48\text{€/m}^2$ para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $2,31\text{€/m}^2$ para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $2,22\text{€/m}^2$ para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

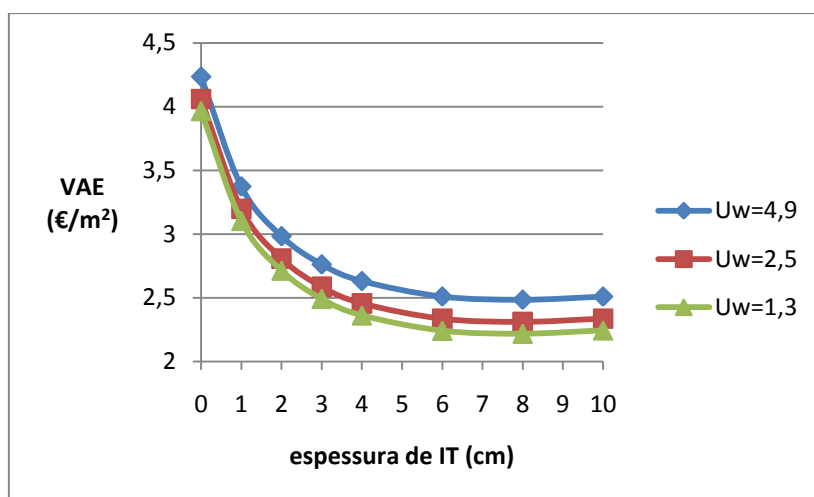


Figura 4.26- Solução óptima para caso IV, em Bragança

As Nic para este caso são de: $94,84\text{kWh/m}^2$ para $U_w=4,9\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $23,26\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar), $74,24\text{kWh/m}^2$ para $U_w=2,5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $43,86\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar) e $64,00\text{kWh/m}^2$ para $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ (diferença de $54,10\text{kWh/m}^2$ para mínimo regulamentar).

A solução óptima tem um custo total de $2,22\text{€/m}^2$, com 8cm de espessura de isolamento térmico nas soluções de envoltivo opaca e vãos envidraçados de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. A esta solução está inerente um valor de Nic de $64,00\text{kWh/m}^2$.

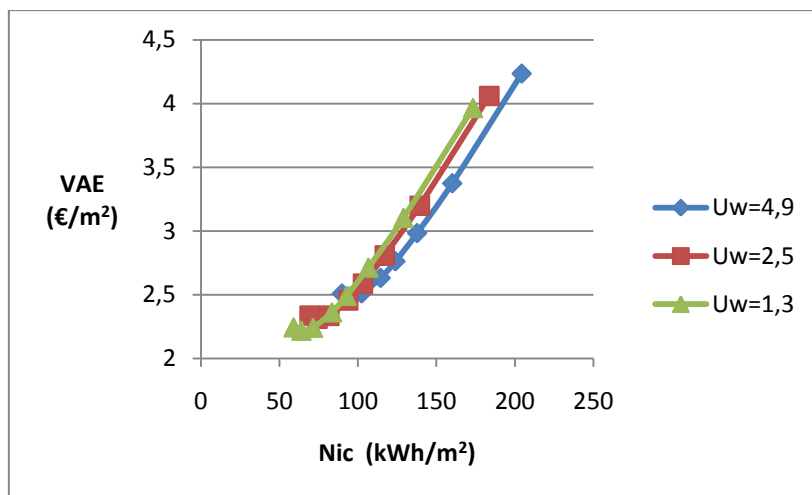


Figura 4.27-Gráfico de custo-óptimo para caso IV, em Bragança

Para o caso IV, mantém-se a tendência das soluções mais próximas terem um vão envidraçado de $U_w=1,3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ variando a espessura de isolamento térmico. As soluções mais próximas são assim: a solução com 6cm de IT com VAE de $2,24\text{€/m}^2$ e Nic de $71,40\text{kWh/m}^2$; a solução com 10cm de IT com VAE de $2,45\text{€/m}^2$ e Nic de $58,99\text{kWh/m}^2$.

4.6.5 Resumo

Para esta localização, mais exigente termicamente que as anteriores, a influência do custo energia é bastante mais evidente. Assim, a inflexão da concavidade nos gráficos custo total–espessura é bastante alargada, sendo muito pouco perceptível a assíntota oblíqua resultante do custo de soluções construtivas. As diferenças entre custos totais disso são exemplo, existindo pouca diferença económica entre soluções, para Nic com diferenças entre $10\text{-}15\text{kWh/m}^2$.

É de salientar que para esta localização, tendo em conta as variáveis fixadas, as soluções de maior custo inicial são as mais economicamente viáveis (com diferenças significativas, 6% a 10%, face à situação referência) e ambientalmente mais favoráveis (com Nic entre 20% e 30% menores que as de referência).

Quadro 4.4-Resumo de resultados para Bragança

		Espessura de IT (cm)	Ni (kWh/m ²)	Nic (kWh/m ²)	Δ Ni-Nic (%)	Δ Nic(ref)- Nic (%)	Custo total optimo (€/m ²)	Δ Custo total (%)
Caso I	Uw=4,9			140,92	-7,057	25,945	3,799	6,882
	Uw=2,5	8		121,56	-19,826	8,642	3,655	2,825
	Uw=1,3		151,62	111,89	-26,204	0,000	3,555	0,000
	Uw=1,3	6		124,39	-17,959	11,172	3,594	1,103
	Uw=1,3	10		103,37	-31,823	-7,615	3,598	1,216
Caso II	Uw=4,9			128,08	-6,695	26,963	3,384	7,069
	Uw=2,5	8		109,94	-19,910	8,981	3,257	3,041
	Uw=1,3		137,27	100,88	-26,510	0,000	3,160	0,000
	Uw=1,3	6		111,14	-19,035	10,170	3,191	0,966
	Uw=1,3	10		93,89	-31,602	-6,929	3,198	1,187
Caso III	Uw=4,9			108,49	-17,910	43,240	2,917	10,934
	Uw=2,5	8		86,63	-34,451	14,378	2,726	3,652
	Uw=1,3		132,16	75,74	-42,691	0,000	2,630	0,000
	Uw=1,3	6		85,08	-35,623	12,332	2,656	1,001
	Uw=1,3	10		69,39	-47,495	-8,384	2,665	1,343
Caso IV	Uw=4,9			94,84	-19,695	48,188	2,485	11,920
	Uw=2,5	8		74,24	-37,138	16,000	2,311	4,095
	Uw=1,3		118,1	64	-45,809	0,000	2,220	0,000
	Uw=1,3	6		71,4	-39,543	11,563	2,244	1,070
	Uw=1,3	10		58,99	-50,051	-7,828	2,246	1,160

Para todos os casos nesta localização as soluções de envolvente opaca têm 8cm de isolamento térmico e vãos envidraçados de $U_w=1,3W/m^2.°C$.

Nesta localização, para todos os casos, é ultrapassado o limite de 15%, com grandes diferenças. No caso I as Nic são 26,2% inferior as Ni, sendo as diferenças de 26,5%, 42,7% e 45,8% para os casos II, III e IV respectivamente.

4.7 Características genéricas

Face aos resultados obtidos é perceptível a existência de padrões nos resultados. Estes padrões são identificados pela morfologia das curvas nos gráficos apresentados, variando segundo dois vectores:

diferenças entre casos de estudo diferentes e diferenças em resultados para zonas climáticas diferentes.

4.7.1 Paralelismo entre diferentes casos de estudo

Como já foi passível de ser verificado previamente, as curvas de custos para casos de estudo diferentes, em relação à mesma localização, são morfologicamente idênticas. Este facto está ligado à construção dos custos, ver Figura 4.2.

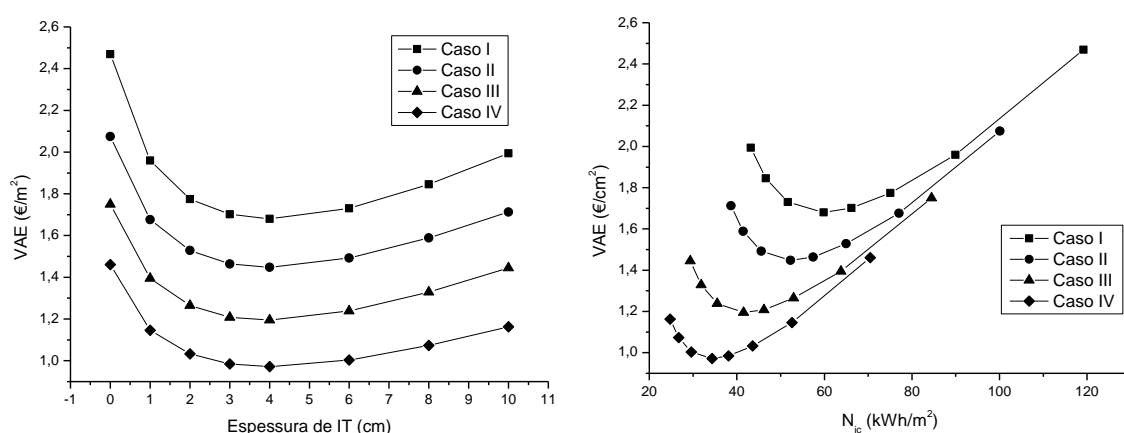


Figura 4.28-Gráficos para os quatro casos de estudo, para Almada, com $U_w=4,9W/m^2 \cdot ^\circ C$

Os custos de energia, para as condições referidas, tendem com aumento da espessura de isolamento térmico a serem cada vez mais próximos embora inicialmente a diferença entre eles pareça constante. Por outro lado, os custos de soluções construtivas, também diferentes para cada caso de estudo, embora inicialmente muito próximos são divergentes com aumento de espessura de isolamento térmico. Sendo os VAE a soma dos custos de energia e custos de soluções construtivas, o que acontece é que a convergência dos custos de energia e a divergência dos custos de soluções técnicas pouco significativas para espessuras de isolamento térmico pequenas resultam num equilíbrio de diferenças entre casos de estudo.

Este equilíbrio mantém-se para espessuras maiores de isolamento térmico com uma maior diferença de custos de soluções técnicas para diferenças cada vez menores de custos de energia entre os diferentes casos. Assim resulta o paralelismo aparente entre custos para casos de estudo diferentes.

Este paralelismo é também identificável para gráficos que relacionem os custos com os valores de N_{ic} . Uma vez que os valores são os mesmos, graficamente essa semelhança também se verifica nestes gráficos.

4.7.2 Evolução com aumento de graus-dias de aquecimento

Com o aumento de graus-dias de aquecimento é perceptível um “alargamento” da concavidade dos gráficos que relacionam o VAE com a espessura de isolamento térmico, resultante do maior peso do custo da energia para o VAE. Por outro lado, nos gráficos que relacionam o VAE com os valores de Nic, denota-se a progressiva maior diferença entre a solução referência e a solução ótima. Nestes identifica-se ainda que o intervalo óptimo de rentabilidade é progressivamente mais pequeno.

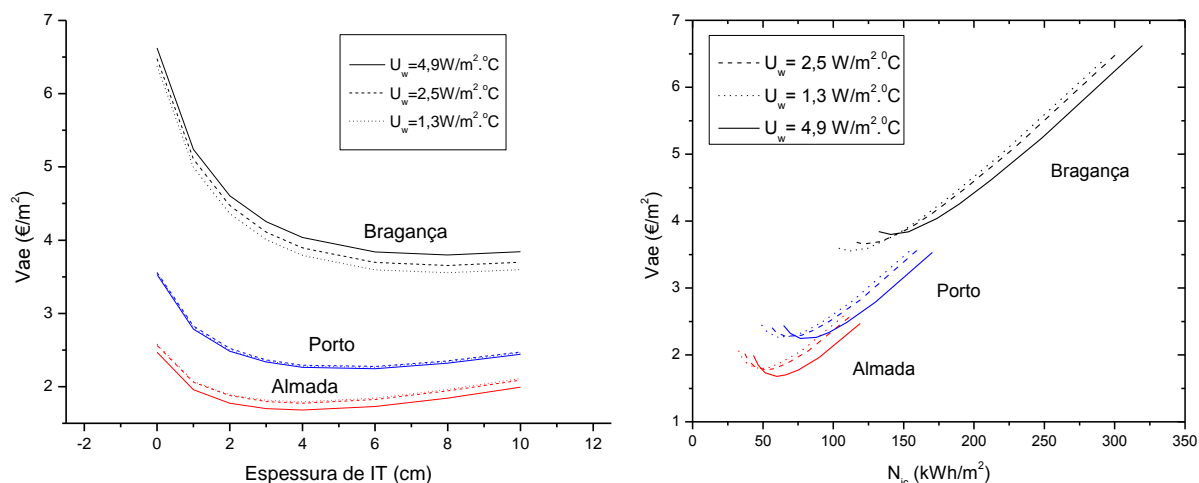


Figura 4.29-Gráficos para diferentes localizações, para Caso I

Em ambos os gráficos, é possível verificar a transição de soluções de menor valor de VAE com vãos envidraçados menos eficientes, para soluções de menor valor de VAE com vãos envidraçados mais eficientes. Tornando evidente que o aumento de graus-dias de aquecimento leva a que soluções inicialmente mais caras se tornem as mais viáveis.

4.8 Análise de sensibilidade

4.8.1 Cenários 1,2 e 3

Para Almada, a análise de sensibilidade indica que os cenários geram custos totais óptimos de maior valor: 1,9€/m², 2,79€/m² e 2,73€/m² para os cenários 1,2 e 3, respectivamente, acompanhando um aumento da resistência térmica nas soluções construtivas.

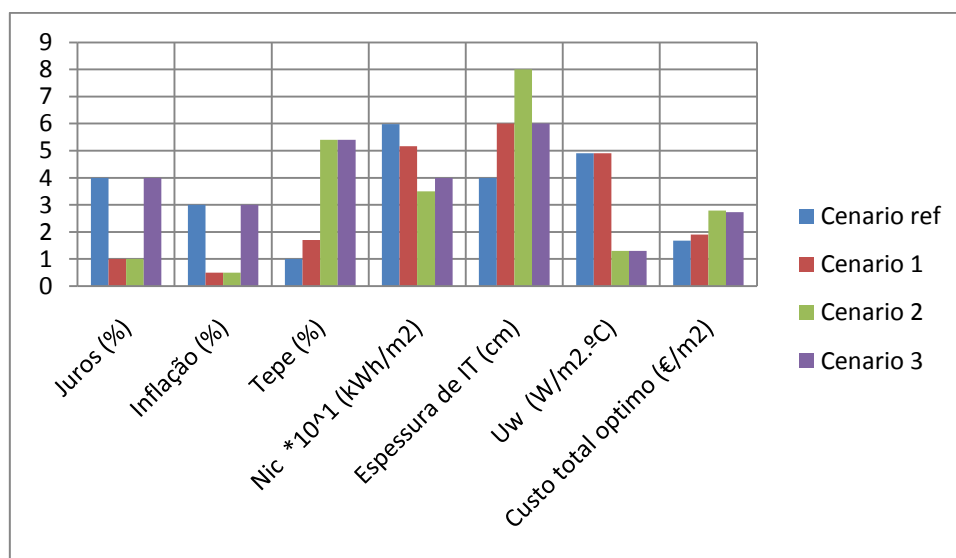


Figura 4.30-Cenários 1,2 e 3, para Almada

Para o Porto, a análise de sensibilidade indica que os cenários geram, de forma idêntica a Almada, custos totais óptimos de maior valor: 2,519€/m², 3,73€/m² e 3,52€/m² para os cenários 1,2 e 3 respectivamente. Também aqui, os custos totais, são acompanhados aumento da resistência térmica nas soluções construtivas.

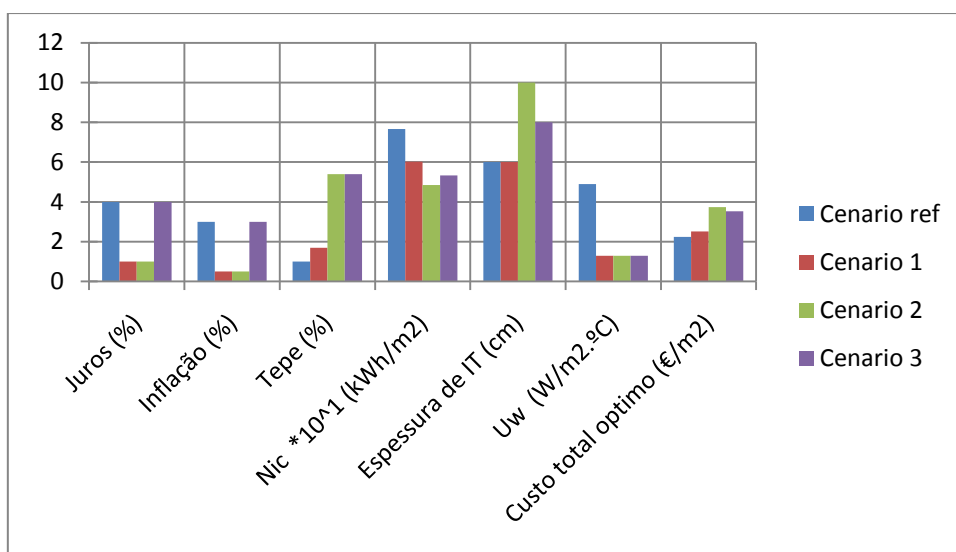


Figura 4.31-Cenários 1,2 e 3, para Porto

Para Bragança a análise de sensibilidade indica que os cenários geram custos totais óptimos de maior valor: 3,93€/m², 4,63€/m² e 4,45€/m² para os cenários 1,2 e 3 respectivamente. Importa referir que os resultados são óptimos para espessuras de isolamento térmico estudadas, embora a tendência seria obter valores mais baixos de custo total (e portanto verdadeiramente óptimos) caso tivessem sido consideradas maiores espessuras de isolamento térmico nas soluções construtivas estudadas.

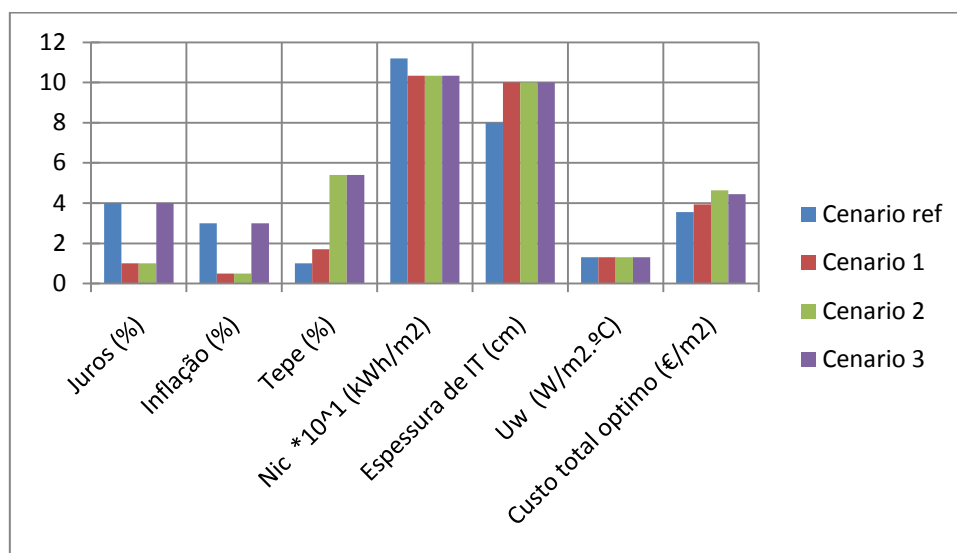


Figura 4.32-Cenários 1,2 e 3, para Bragança

Através da observação, em particular do Quadro 4.5, o cenário referência considerado revela-se o mais optimista/favorável, uma vez que comporta um menor resultado de custo óptimo, alicerçado num menor custo de energia. Nos restantes casos, o custo da energia torna-se demasiado elevado, proporcionando a definição de soluções construtivas óptimas de maior resistência térmica, acompanhadas de menores valores de Nic, como aliás, se confirma pela carência de valores óptimos para o caso de Bragança.

Para todos os cenários considerados as soluções óptimas provocam diferenças de Nic superiores (muito superiores para os cenários 3 e 4 em particular) aos 15% de diferença máxima pretendida pela EPBD.

Quadro 4.5-Resumo de resultados da análise a cenários 1,2 e 3

	Cenário	Solução óptima		Custo optimo (€/m ²)	Δ (%)	Nic (kWh.m ²)	Δ (%)
		espessura de IT (cm)	Uw (W/m ² .°C)				
Almada	Ref.	4	4,9	1,68	0,00	59,85	0,00
	1	6	4,9	1,90	13,10	51,67	-13,67
	2	8	1,3	2,79	66,07	34,98	-41,55
	3	6	1,3	2,73	62,50	39,98	-33,20
Porto	Ref.	6	4,9	2,25	0,00	76,58	0,00
	1	6	1,3	2,52	12,15	60,26	-21,31
	2	10	1,3	3,73	66,16	48,50	-36,67
	3	8	1,3	3,52	56,86	53,25	-30,46
Bragança	Ref.	8	1,3	3,55	0,00	111,89	0,00
	1	10	1,3	3,93	10,70	103,37	-7,61
	2	10	1,3	4,63	30,42	103,37	-7,61
	3	10	1,3	4,45	25,35	103,37	-7,61

4.8.2 Cenários A e B

Nos cenários A e B, como descrito no anteriormente, são tidos equipamentos mais eficientes do que os considerados nos cálculos de custo óptimo. Para Almada, como seria expectável o custos óptimo baixa, para o cenário A, aumentado as Nic. Por outro lado para o cenário B, o custo óptimo aumenta e os valores de Nic baixam. Os custos óptimos reduzem-se no cenário A para 1,244€/m² e aumentam para 2,147€/m² para o cenário B. As Nic para o cenário A reduzem para 66,2kWh/m² (sendo que esta redução coloca as soluções acima dos mínimos regulamentares para este caso em Almada são) 64,38 kWh/m²). No cenário B as Nic reduzem-se para 51,67kWh/m².

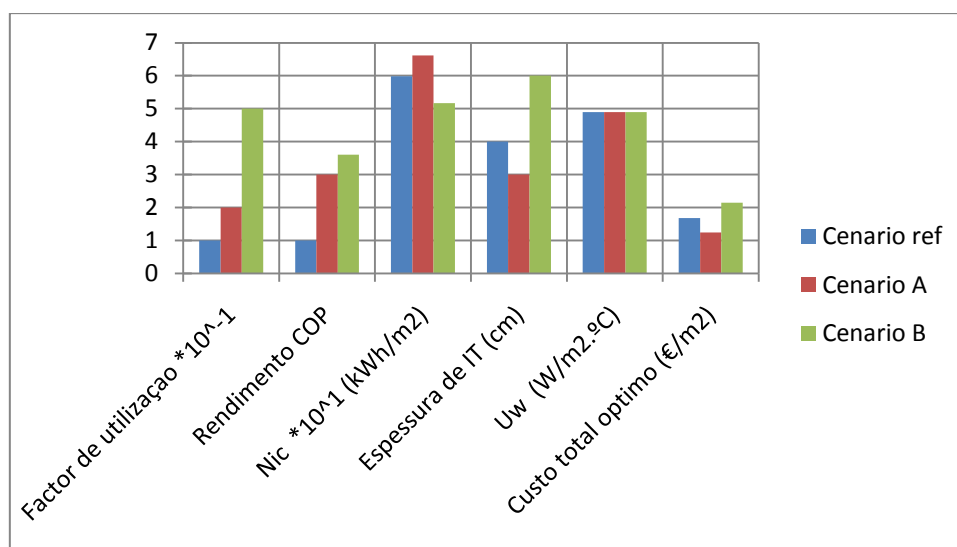


Figura 4.33-Cenários A e B, para Almada

Os cenários A e B, para o Porto propiciam resultados idênticos aos verificados para Almada. Os custos óptimos, no cenário A, reduzem-se para 1,654€/m² e aumentam no cenário B, significativamente, para 4,350€/m². As Nic, no cenário A, aumentam para 87,97kWh/m² (sendo o mínimo regulamentar de 87,61kWh/m²), enquanto baixam para 48,50 kWh/m² no cenário B.

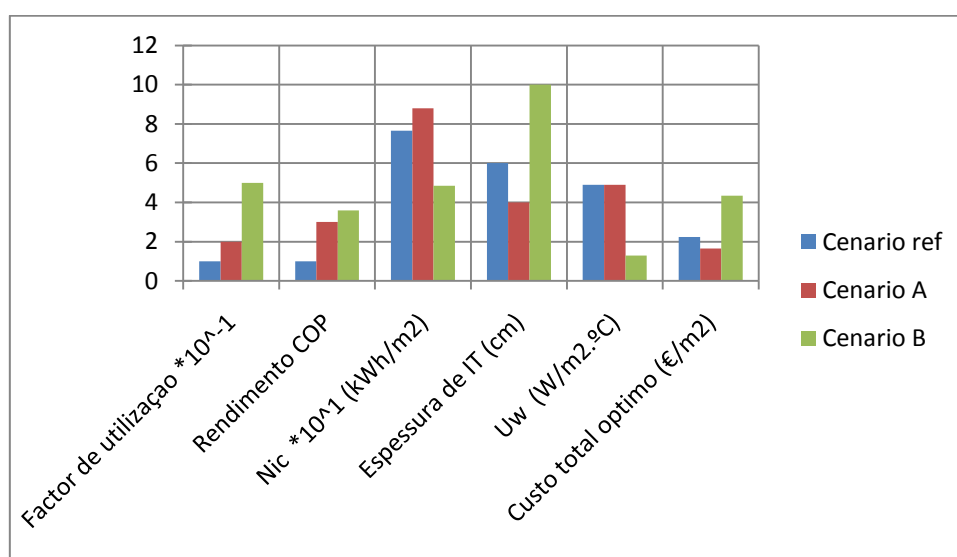


Figura 4.34-Cenários A e B, para Porto

Para Bragança, o custo óptimo baixa, no cenário A, para 2,735€/m², as Nic, 124,39kWh/m², mantêm-se dentro dos limites regulamentares. No cenário B, o custo óptimo passa a ser de 4,431€/m² e as Nic de 103,37 kWh/m².

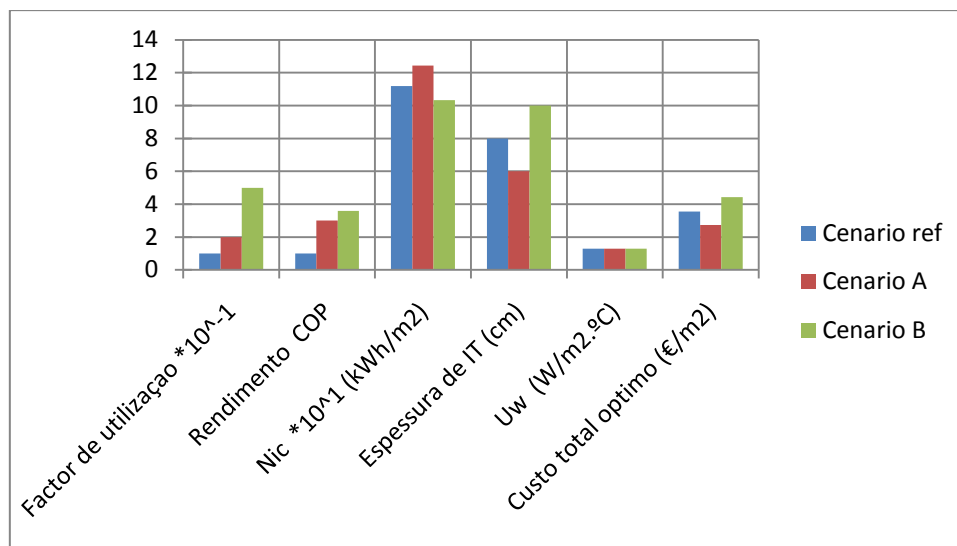


Figura 4.35-Cenários A e B, para Bragança

Face aos cenários considerados verificam-se resultados divergentes para os dois cenários. Para o cenário A ocorre, em absoluto, um menor consumo de energia e portanto há uma redução do gasto energético para aquecimento. Devido ao menor gasto de energia o custo para aquecimento é menor, existindo uma menor necessidade de rigor de soluções técnicas para a envolvente, existindo assim uma redução da espessura óptima de isolamento térmico e menores custos óptimos. Para o cenário B verifica-se um maior consumo energético. Com uma maior representação do custo de energia, verifica-se um aumento de rigor para as soluções técnicas (especialmente evidente em para Porto). Como tal ocorre um maior gasto tanto de energia como de soluções técnicas, convergindo em maiores custos óptimos.

Quadro 4.6-Resumo de resultados da análise a cenários A e B

	Cenário	Solução óptima		Custo optimo (€/m ²)	Δ (%)	Nic (kWh.m ²)	Δ (%)
		espessura de IT (cm)	Uw (W/m ² .°C)				
Almada	Ref.	4	4,9	1,68	0,00	59,85	0,00
	A	3	4,9	1,24	-25,95	66,20	10,61
	B	6	4,9	2,15	27,80	51,67	-13,67
Porto	Ref.	6	4,9	2,25	0,00	76,58	0,00
	A	4	4,9	1,65	-26,54	87,97	14,87
	B	10	1,3	4,35	93,68	48,50	-36,67
Bragança	Ref.	8	1,3	3,55	0,00	111,89	0,00
	A	6	1,3	2,74	-22,96	124,39	11,17
	B	10	1,3	4,43	24,82	103,37	-7,61

5 Conclusões e desenvolvimento futuros

5.1 Conclusões

O trabalho realizado nesta dissertação pretendeu avaliar as distâncias entre N_{ic} e N_i , e verificar se respeitam uma diferença inferior a 15% dos mínimos regulamentares. Identificando, no processo, soluções mais adequadas para as diferentes zonas climáticas consideradas.

Perante os cenários considerados, todos resultados obtidos indicaram como soluções de custo-óptimo, soluções que cumprem os mínimos regulamentares. Para estes, as diferenças entre as N_{ic} obtidas variam entre 7% (caso I em Almada) e 45% (caso IV em Bragança), sendo na generalidade, inferiores aos 15% considerados aceitáveis. As diferenças verificadas foram tanto maiores, quanto maiores as exigências climáticas do local em estudo. Quanto maior o potencial de poupança, mais viáveis se tornam soluções de maior resistência térmica. Estas, embora de maior custo inicial, acabam por suplantam esse custo, com uma maior poupança, levando a menores N_{ic} e como resultado maiores diferenças para as N_i do caso em estudo.

O método utilizado, sendo de critério estritamente económico, fortemente influenciado por conjecturas sobre o preço da energia, acaba por indicar, para as soluções óptimas em Almada e Porto, vãos envidraçados de $U_w=4,9W/m^2 \cdot ^\circ C$. A indicação como soluções óptimas é aqui restrita ao factor económico, uma vez que a consideração destes vãos envidraçados do ponto de vista técnico provocaria heterogeneidades térmicas no edifício e impacto no conforto.

Os resultados obtidos têm um grau de erro inerente aos pressupostos tomados, nomeadamente na construção dos custos. Aliado a isso, o facto das soluções serem consideradas óptimas por um critério estritamente económico, leva a que estas tenham um cariz indicativo. Assim sendo, permitem um despiste útil em casos de soluções claramente distantes, mas carecem de uma análise mais pormenorizada para situações de grande proximidade técnica e económica.

Face a situações de pequenas diferenças em termos económicos (como é o caso das soluções para o Porto), a decisão final da melhor solução, deve ter um carácter conservador, no sentido de capacitar o edifício para menores necessidades de energia para climatização, como é verificado pela análise de sensibilidade. Desta forma, o custo total deve depender o menos possível do custo da energia (nomeadamente custos associados à manutenção e reparação de sistemas de aquecimento) e mais de custos de soluções construtivas.

Para concluir, a análise de custos-óptimos, como ferramenta que gera sustentabilidade e eficiência, teria vantagens em ser prática corrente. Dessa forma, deveria haver uma maior concordância entre exigências mínimas regulamentares e os custos-óptimos. A sustentar isso, tenha-se como exemplo, a diferença entre N_i e N_{ic} para Bragança (-45%) e a diferença de custo que aí se verifica entre o custo óptimo e o custo de referência, -10,6%.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Este tema tem uma grande margem para futuros estudos e desenvolvimentos, de forma a garantir uma maior assertividade, abrangência dos resultados e, em consequência, maior influência na elaboração de projectos relacionados com a térmica de edifícios. Essa assertividade pode ser atingida ao considerar:

- Soluções construtivas com outros materiais de isolamento térmico de menor condutibilidade térmica e maiores custos;
- As diferenças de custos entre sistemas de aquecimento, considerando actuais e novos sistemas de diferentes eficiências;
- Considerar para os custos o impacto de geração de energia de fontes renováveis para fins de aquecimento;
- Considerar outras soluções de climatização passiva, como são as paredes de Trombe e coberturas ajardinadas;
- Utilização de programas de optimização que gerem resultados considerando um maior número de variáveis em simultâneo.

Bibliografia

1. **Comissão das Comunidades Europeias.** A comunidade Europeia e o problema energética, Office des publications des communautés. 1983, p. 58.
2. **Resolução de Conselho de Ministros nº20/2013.** *Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética.* s.l. : Diário de República 1ª série nº70, 2013.
3. *Directiva 2010/31/UE - Energy Performance of Buildings Directive recast.* s.l. : Jornal Oficial da União Europeia, 2010.
4. **Concerted Action EPBD.** *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive featuring Country Reports 2012.* 2013.
5. *Decreto Lei nº80/2006 - Regulamento de Comportamento de Características Térmicas de Edifícios.* s.l. : Diário da República 1ª série nº67, 2006.
6. **Blank, Leland & Tarquin, Anthony.** *Engineering Economy - 6th edition.* s.l. : McGraw Hill, 2005.
7. **Fuller, Sieglinde & Petersen, Stephen.** *Life-Cycle Costing Manual for Federal Energy Management Program - NIST Handbook 135.* 1996.
8. **Gluch, P. & Baumann, H.** *The life cycle costing approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making.* s.l. : Building and Environment nº39, 2004. pp. 571-580.
9. **Cole, Raymond & Sterner, Eva.** *Reconciling theory and practice of life cycle costing.* s.l. : Building research and Information, 2000. pp. 368-375.
10. **Flanagan, Roger & Jewell, Carol.** *Whole life appraisal for construction.* Oxford : Blackwall Publishing, Ltd, 2005.
11. *Decreto-lei nº59/99 - Regime jurídico das empreitadas de obras públicas.* 2 de Março 1999.
12. **Gustafsson, Stig-Inge.** *Optimisation of insulation measures on existing buildings.* s.l. : Energy and Buildings, 2000. pp. 49-55.
13. **Ruegg, Rosalie & Marshall, Harold.** *Energy Conservation through Life-Cycle Costing.* s.l. : Energy and Architecture, 1977. pp. 42-53. Vol. 30, Acesso em:<http://www.jstor.org/stable/1424308>.
14. **Schade, Jutta.** *Life cycle cost calculation models for buildings.* 2007.
15. *EN 15459 - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings.* 2008.
16. **Langdon, Davis.** *Life Cycle Costing as contribution to sustainable construction: a common methodology.* s.l. : Davis Langdon - Management Consulting, 2007.
17. **Woodward, D.** *Life cycle costing - theory, information, acquisition and application.* s.l. : Staffordshire University Business School, UK, 1997.

18. **Kishk, Mohammed, et al.** *Whole life costing in construction: A state of the art review*. s.l. : RICS Foundation, 2003.
19. **Babbitt, D.J.** *The optimum thickness of insulation for Canadian homes*. s.l. : National Research Council - Canada, 1940.
20. **Beach, Richard K.** *Determining the optimum thickness of insulation for heated buildings*. s.l. : National Research Council - Division of Building Research, 1965.
21. **Yu, Jinghua, et al.** *A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China*. s.l. : Applied Energy 86, 2009.
22. **Çay, Yusuf & Gurel, Ali.** *Determination of optimum insulation thickness, energy savings, and environmental impact for different climatic regions of Turkey*. s.l. : AIChE, 2012.
23. **Mishra, Subhash; Usmani, J.A. & Varshney, Sanjeev.** *Optimum insulation thickness of the external walls and roof for different degree-days region*. s.l. : IJERT, 2012.
24. **Hasan, Afif.** *Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost*. s.l. : Applied Energy 63, 1999.
25. **Dombayci, Altan; Golcu, Mustafa & Pancar, Yasar.** *Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources*. s.l. : Applied Energy 83, 2005.
26. **Ozel, Meral.** *Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method*. s.l. : Applied Energy, 2010.
27. **Axaopoulos, Ioannis; Axaopoulos, Petros & Gelegenis, John.** *Optimum insulation thickness for external walls on different orientations considering the speed and direction of the wind*. s.l. : Applied Energy, 2013.
28. **Verbeeck, G & Hens, H.** *Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?* s.l. : Energy and Buildings 37, 2005.
29. **Boermans, Thomas & Petersdorff, Carsten, et al.** *Eurima-Ecofys VII Report: U-values for better energy performance of buildings*. s.l. : Ecofys, 2007.
30. **Ostermeyer, York; Schryver, An de & Wallbaum, Holger.** *Optimal insulation thicknesses according to different indicators for Germany*. 2011.
31. **Dylewski, Robert & Adamczyk, Janusz.** *Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls*. s.l. : Building and Environment 46, 2011.
32. *Regulamento Delegado nº244/2012 - Complementa a Directiva 2010/31/UE*. 16 de Janeiro de 2012, Jornal Oficial da União Europeia, Vol. L81.
33. **INE e LNEC.** *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011*. 2013.
34. **INE.** *Censos 2011*.
35. **Cabrita, A.M. & Oliveira, Carlos.** *Tipificação do Parque Habitacional*. Lisboa : LNEC, 1985.

36. **Freitas, Vasco.** *Apontamentos de apoio FEUP, Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior - ETICS.* 2002.
37. **Mateus, Ricardo & Bragança, Luis.** *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção.* Porto : Prometeu, 2006. pp. 264-267.
38. **Becchio, Crisitina, et al.** *Whole cost analysis of Building Envelope technologies according to the European Standard EN 15459.*
39. **Veiga, M. Rosário & Malanho, Sofia.** *Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS): Comportamento global e influência dos componentes.* LNEC. Lisboa : LNEC, 2010.
40. **Kunzel, Helmut; Kunzel, Hartwig & Sedlbauer, Klaus.** *Long-term Performance of External Thermal Insulation Systems (ETICS).* s.l. : Architectura, 2006. Vol. 5.
41. **Amaro, B, et al.** *Levantamento estatístico da inspeção, diagnóstico e reparação de ETICS em paredes.* 4º Congresso Português de Argamassa e ETICS, APFAC : s.n., 2012.
42. **Henriques, Fernando & Rato, Vasco.** *Avaliação do risco de ocorrência de condensações internas em coberturas planas. Cadernos Edifícios 3.* Lisboa : LNEC, 2004.
43. **Saint-Gobain Glass.** *Manual do Vidro.* 2008.
44. *EN 673 - Glass in building. Determination of thermal transmittance (Uvalue). Calculation method.* 2011.
45. **Rodrigues, A; Canha da Piedade, A & Braga, A.** *Térmica de Edifícios.* s.l. : Edições Orion, 2009.
46. [Online] https://www.bportugal.pt/en-US/EstudosEconomicos/Publicacoes/BoletimEconomico/Publications/projecoes_e.pdf.
47. [Online] <http://expresso.sapo.pt/desinflacao-prosegue-na-zona-euro-e-em-portugal=f857779>.
48. [Online] <http://www.efe.com/efe/noticias/portugal/portugal/portugal-estima-para-2014-uma-subida-infla/6/60016/2205192>.
49. *Electricity prices scenarios until a least the year 2020 in selected EU countries - PV Parity project.* 2012.
50. *Energy Roadmap 2050 - European Comission.* 2011.
51. [Online] <http://www.publico.pt/economia/noticia/jorge-vasconcelos-electricidade-aumentara-20-a-30-ate-2030-1534551>.
52. **Wright, Graham.** *Calculating Window Performance Parameters for Passive House Energy Modelling.* s.l. : PHIUS Tech Corner, Vol1,No.4., 2012.

ANEXO I – Custos

Coeficientes de transmissão térmica de elementos de envolvente opaca(em $W/m^2 \cdot ^\circ C$):

Espessura de isolamento térmico (cm)	0	1	2	3	4	6	8	10
Parede, zona corrente	1,34	1	0,80	0,67	0,57	0,45	0,36	0,31
Ponte térmica plana	3,07	1,74	1,21	0,93	0,75	0,55	0,43	0,35
Cobertura	1,34	0,99	0,78	0,64	0,55	0,42	0,34	0,29

Custo de Soluções Construtivas – Isolamento térmico

Caso I

espessura de isolamento térmico (cm)	Custo incremental ($\text{€}/\text{m}^2$)	Custo de Soluções técnicas (de acordo com equação 4.2)		
		Custo $U_w=4,9$ ($\text{€}/\text{m}^2$)	Custo $U_w=2,5$ ($\text{€}/\text{m}^2$)	Custo $U_w=1,3$ ($\text{€}/\text{m}^2$)
0	0,000	0,000	0,257	0,357
1	1,150	0,096	0,353	0,453
2	2,640	0,220	0,477	0,577
3	3,960	0,330	0,587	0,687
4	5,280	0,440	0,697	0,797
6	7,920	0,659	0,916	1,016
8	10,560	0,879	1,136	1,236
10	13,200	1,099	1,356	1,456

Caso II

espessura de isolamento térmico (cm)	Custo incremental (€/m ²)	Custo de Soluções técnicas (de acordo com equação 4.2)		
		Custo Uw=4,9 (€/m ²)	Custo Uw=2,5 (€/m ²)	Custo Uw=1,3 (€/m ²)
0	0,000	0,000	0,249	0,340
1	1,150	0,079	0,328	0,420
2	2,640	0,182	0,431	0,523
3	3,960	0,274	0,522	0,614
4	5,280	0,365	0,613	0,705
6	7,920	0,547	0,796	0,888
8	10,560	0,730	0,978	1,070
10	13,200	0,912	1,161	1,252

Caso III

espessura de isolamento térmico (cm)	Custo incremental (€/m ²)	Custo de Soluções técnicas (de acordo com equação 4.2)		
		Custo Uw=4,9 (€/m ²)	Custo Uw=2,5 (€/m ²)	Custo Uw=1,3 (€/m ²)
0	0,000	0,000	0,262	0,391
1	1,150	0,073	0,334	0,464
2	2,640	0,167	0,429	0,558
3	3,960	0,251	0,512	0,642
4	5,280	0,335	0,596	0,726
6	7,920	0,502	0,763	0,893
8	10,560	0,669	0,931	1,060
10	13,200	0,836	1,098	1,227

Caso IV

espessura de isolamento térmico (cm)	Custo incremental (€/m ²)	Custo de Soluções técnicas (de acordo com equação 4.2)		
		Custo Uw=4,9 (€/m ²)	Custo Uw=2,5 (€/m ²)	Custo Uw=1,3 (€/m ²)
0	0,000	0,000	0,253	0,374
1	1,150	0,057	0,310	0,431
2	2,640	0,130	0,383	0,504
3	3,960	0,195	0,448	0,569
4	5,280	0,260	0,513	0,634
6	7,920	0,390	0,643	0,764
8	10,560	0,520	0,773	0,894
10	13,200	0,649	0,903	1,024

Custo de Energia e Valores Anuais Equivalentes

Almada

Caso I

[illegible]

Caso II

[illegible]

Caso 3

[illegible]

Caso 4

[illegible]

Porto

Caso I

[illegible]

Caso II

[illegible]

Caso III

[illegible]

Caso IV

[illegible]

Bragança

Caso I

[illegible]

Caso II

[illegible]

Caso III

[illegible]

Caso IV

[illegible]

Anexo II – Custo de janelas e cálculo de U_w

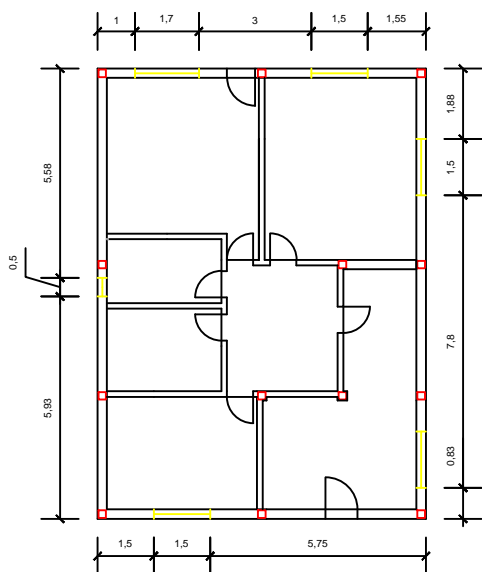
Custo de vãos envidraçados:

			Uw=4,9 (W/m².°C)	Uw=2,5 (W/m².°C)	Uw=1,3 (W/m².°C)
		unidades	custo (€)	custo (€)	custo (€)
Caso I	A (0,5mx1m)	1	50	70,57	91,06
	B (1,5mx1m)	5	177	299,26	344,33
	C (1,5mx2m)	0	350	438,95	517,59
	Custo		935	1566,87	1812,71
	Δ de custo		0	631,87	877,71
Caso II	A (0,5mx1m)	0	50	70,57	91,06
	B (1,5mx1m)	5	177	299,26	344,33
	C (1,5mx2m)	0	350	438,95	517,59
	Custo		885	1496,3	1721,65
	Δ de custo		0	611,3	836,65
Caso III	A (0,5mx1m)	2	50	70,57	91,06
	B (1,5mx1m)	8	177	299,26	344,33
	C (1,5mx2m)	3	350	438,95	517,59
	Custo		2566	3852,07	4489,53
	Δ de custo		0	1286,07	1923,53
Caso IV	A (0,5mx1m)	0	50	70,57	91,06
	B (1,5mx1m)	8	177	299,26	344,33
	C (1,5mx2m)	3	350	438,95	517,59
	Custo		2466	3710,93	4307,41
	Δ de custo		0	1244,93	1841,41

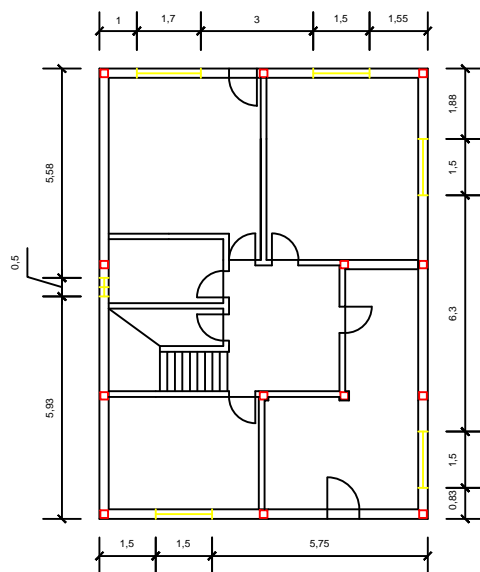
Cálculo de U_w segundo EN673 (o valor de psi é o apontado como mais conservativo em [52]):

Janel a	U _g (W/m ² .° C)	U _f (W/m ² .° C)	Psi (W/m.° C)	Largur a (m)	Altur a (m)	Dimens ão de caixilho (m)	Ag (m ²)	Af (m ²)	Lps i (m)	Uw (W/m ² .° C)
A	2,7	1,3	0,05	0,7	1	0,08	0,453	0,246	2,7 6	2,40434
B	2,7	1,3	0,05	1,5	1	0,08	1,125	0,374	4,3 6	2,49589
C	2,7	1,3	0,05	1,5	2	0,08	2,465	0,534	6,3 6	2,55661
A	1,3	1,3	0,05	0,7	1	0,08	0,453	0,246	2,7 6	1,39714 3
B	1,3	1,3	0,05	1,5	1	0,08	1,125 6	0,374	4,3 6	1,34533
C	1,3	1,3	0,05	1,5	2	0,08	2,465	0,534	6,3	1,306

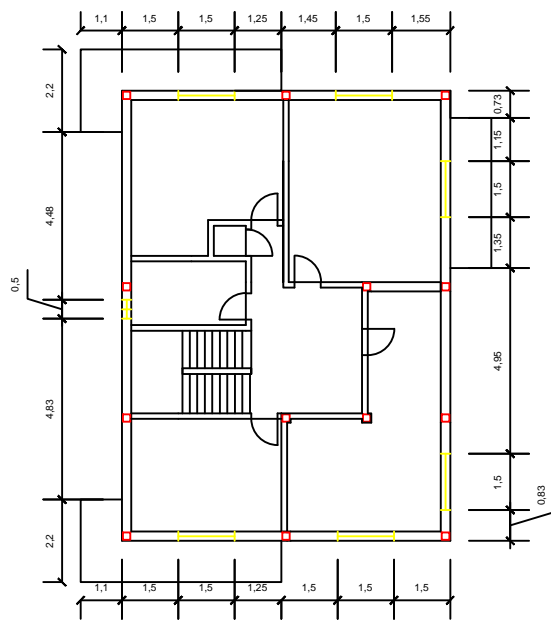
Anexo III – Desenhos técnicos



Planta Caso I e II

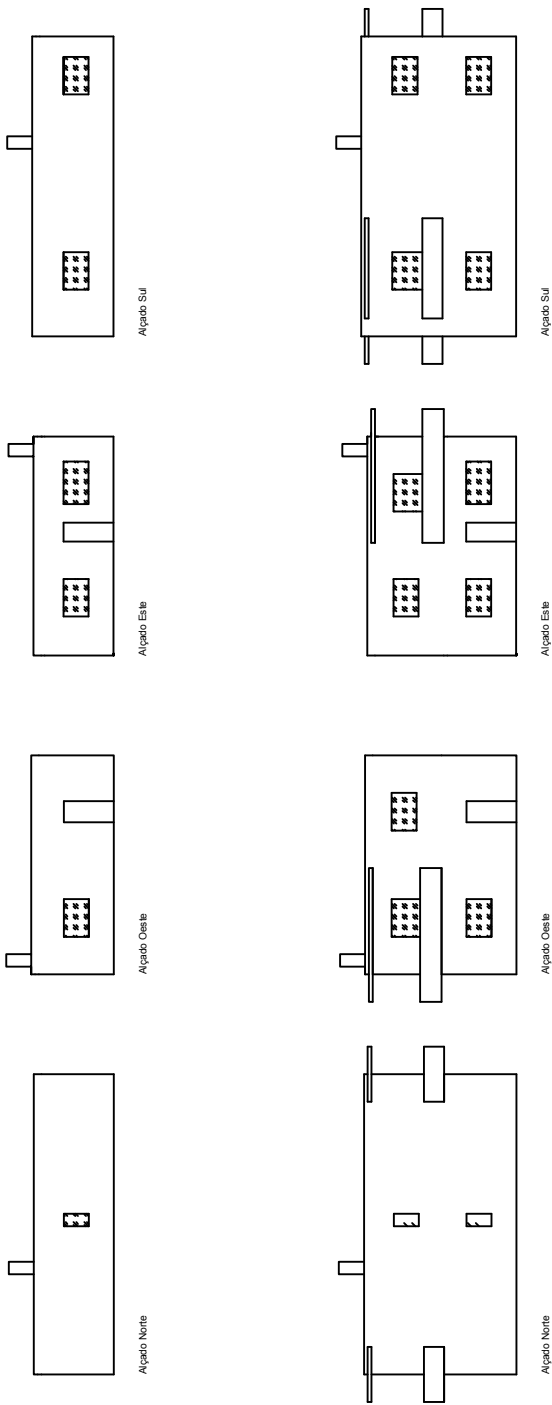


Planta Piso 1 - Caso III e IV



Planta Piso 2 - Caso III e IV

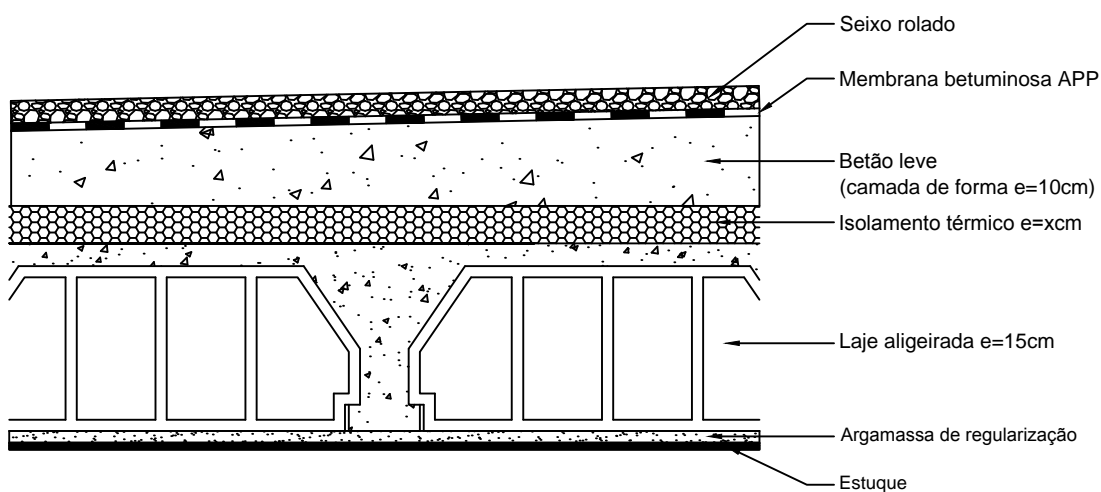
Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia		Mestrado Integrado em Engenharia Civil	
Dissertação de Mestrado		Peça desenhada nº1:	
Orientador: Prof.Dr. Daniel Aelenei		Plantas de casos de estudo	
Elaborado por: João Xavier nº27781		Março 2014	Escala 1:200



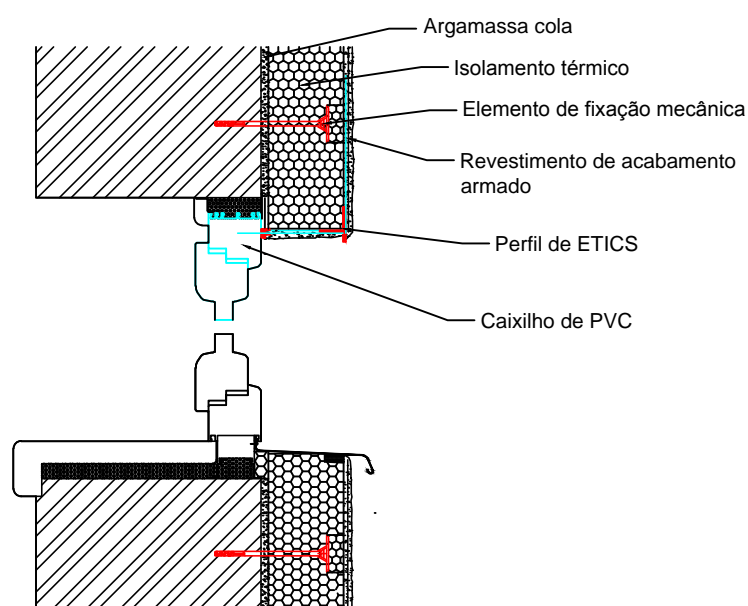
Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia	Mestrado Integrado em Engenharia Civil	
Orientador: Prof.Dr. Daniel Aelenei	Peça desenhada nº2:	
	Alçados de casos de estudo	
	Elaborado por: João Xavier	Março 2014
nº27781		Escala 1:300



Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia		Mestrado Integrado em Engenharia Civil	
Dissertação de Mestrado		Peça desenhada nº3: Corte transversal em zona de pilar	
Orientador: Prof.Dr. Daniel Aelenei			
Elaborado por: João Xavier nº27781		Março 2014	Escala 1:10



Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia		Mestrado Integrado em Engenharia Civil	
Dissertação de Mestrado		Peça desenhada nº4: Corte de cobertura	
Orientador: Prof.Dr. Daniel Aelenei			
Elaborado por: João Xavier nº27781		Março 2014	Escala 1:10



Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia		Mestrado Integrado em Engenharia Civil	
Dissertação de Mestrado		Peça desenhada nº5:	
Orientador: Prof.Dr. Daniel Aelenei		Corte longitudinal em zona de vão envidraçado	
Elaborado por: João Xavier nº27781		Março 2014	Escala 1:10